

Universität Duisburg-Essen
Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker

Masterarbeit

Softwaregestützte Filtereinstellung einer Messkamera

Matthias Türpe

Betreuer

Dr. Christian Raeder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker

Januar 2017

Erklärung

Ich erkläre, dass die Arbeit bis auf die offizielle Betreuung durch den Aufgabensteller selbstständig verfasst wurde. Die verwendeten Quellen, sowie die verwendeten Hilfsmittel sind vollständig angegeben. Wörtlich übernommene Textteile und übernommene Bilder und Zeichnungen sind in jedem Fall kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung, Zielsetzung und Forschungsfrage	1
1.2	Gliederung der Arbeit	1
2	Grundlagen	3
2.1	Kenngrößen optischer Strahlung	3
2.2	Sonnenofen	4
2.3	Hochleistungsstrahler	8
2.4	Physikalische Grundlagen	9
2.4.1	Messkamera	10
2.4.2	Objektiv	10
2.4.3	Neutraldichtefilter	12
2.4.4	Strahlungsflussdichtemessung	13
3	Messungen	17
3.1	Objektivwahl und ND-Filtergröße	17
3.2	Bestimmung der Doppelreflexion	19
4	Konstruktion Filterrads	25
4.1	Aufgabe des Filterrades	25
4.2	Entwurf	26
4.2.1	Phoropter	26
4.2.2	Diaprojektor	27
4.2.3	Filtrerrad	28
4.2.4	Bewertung und Auswahl der Entwürfe	29
4.3	Konstruktion und Dimensionierung der Antriebe	30
4.3.1	01.01.16 Filterrads	31

4.3.2	01.02.16 Halterad	32
4.3.3	01.03.16 Welle	33
4.3.4	01.04.16 Vorderwand	33
4.3.5	01.05.16 Rückwand	34
4.3.6	01.06.16 Kameraanschluss	35
4.3.7	Filter	36
4.3.8	Antriebe	37
4.4	Zusammenbau	40
5	Programmierung	43
5.1	Software LabVIEW	43
5.2	Softwarearchitektur	43
5.3	Programmablauf	45
6	Fazit und Ausblick	55
	Literatur	56
A	Anhang Messwerte	58
B	Anhang Fertigungszeichnungen	67
C	Anhang Technik	78

Abbildungsverzeichnis

2.1	Wellenspektrum	3
2.2	Sonnenofen	5
2.3	Sonnenwinkel	5
2.4	Foto des Sonnenofens	6
2.5	Foto des Heliostaten	6
2.6	Direkte Sonnenstrahlung	7
2.7	Hochleistungsstrahler	8
2.8	Seitenansicht einer HLS-Lampe	9
2.9	Kenngrößen Linse	10
2.10	Objektive	11
2.11	Bildausschnitte	12
2.12	Gardon Radiometer	14
2.13	1. Schritt Strahlungsflussdichtemessung	15
2.14	2. Schritt Strahlungsflussdichtemessung	15
2.15	3. Schritt Strahlungsflussdichtemessung	16
2.16	Auswertung	16
3.1	Bildkreis	18
3.2	Ulbrichtkugelversuch	19
3.3	Neutraldichtefilter1	20
3.4	Neutraldichtefilter2	21
3.5	Neutraldichtefilter3	22
3.6	Neutraldichtefilter4	22
3.7	NDDK	23
4.1	Phoropter	26
4.2	Phoropter-Entwurf	27

4.3	Diaprojektor	28
4.4	Filterrad	29
4.5	Filterradkonstruktion	31
4.6	Halterad	32
4.7	Achse	33
4.8	Vorderwand	34
4.9	Vorder- und Rueckansicht der Rueckwand	35
4.10	Kameraanschluss	36
4.11	Motor mit Getriebe und Rückwand	40
4.12	Filterrad mit Rückwand	41
4.13	Filterrad Vorderwand	42
4.14	Filterrad Rückseite	42
5.1	Grundgerüst	44
5.2	Aufbau Frontpanel	45
5.3	Eingänge	46
5.4	Programmablaufplan	48
5.5	Positionsbestimmung	49
5.6	Struktur Initialisierung	50
5.7	Erster Schritt Zustand Fahren	51
5.8	Zweiter Schritt Zustand Fahren	51
5.9	Dritter Schritt Zustand Fahren	52
5.10	Struktur Grauwertvergleich	53
C.1	Schaltplan Filterrad	78
C.2	Ausschnitt Datenblatt SMCP33	83

Tabellenverzeichnis

2.1	Kenngrößen optischer Strahlung	4
4.1	Bewertung der Entwürfe	30
4.2	Filterkombinationen	36
4.3	Parameter Drehmoment	37
5.1	Eingangsparameter	45

Nomenklatur

Abb.	Abbildung
BLDC	Brushless Direct Current
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CSP	Concentrated Solar Power
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DNI	Direct Normal Irradiation (solare Direktstrahlung)
ESA	European Space Agency
FATMES	Flux And Temperature Measurement System
FMAS	Flux Mapping Acquisition System
FPS	Frames Per Second
HLS	DLR - Hochleistungsstrahler
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
SOF	DLR - Sonnenofen

1 Einleitung

Die folgenden Kapitel erläutern die Grundlagen und die Arbeitsschritte zur Durchführung der vorliegenden Masterarbeit mit dem Thema „Softwaregestützte Filtereinstellung einer Messkamera“.

1.1 Problemstellung, Zielsetzung und Forschungsfrage

Das Institut für Solarforschung betreibt drei Großanlagen, bei denen die optische Messung der Leistungsdichte in W/m^2 von entscheidender Bedeutung ist. Im Jahr 2015 wurde bereits das alte Messsystem mit dem Namen FATMES (Flux and Temperature Measurement System) durch das neue Messsystem FMAS (Flux Mapping Acquisition System) ersetzt. Aufgrund der Weiterentwicklung elektrischer Komponenten ist die Messung mit dem neu entwickelten Messsystem 10-fach schneller möglich. Das zunächst eingesetzte Filterrad zur Reduzierung der Strahlung ist 20 Jahre alt und lässt sich händisch und langsam der unterschiedlichen Strahlung anpassen.

Die zunehmende Automatisierung in der Industrie und die fortschrittliche Entwicklung elektrischer Komponenten ermöglichen eine Automatisierung der Einstellung des Filterrades. Des Weiteren wird die Bedienung vom Benutzer vollständig entkoppelt. Zusätzlich ermöglicht die Verkleinerung von elektrischen Bauteilen die örtliche Verlagerung des Filterrades.

Eine automatisierte Filtereinstellung ist nicht nur vorteilhaft hinsichtlich der Messung der Leistungsdichte an den drei Großanlagen. Die europäische Raumfahrtorganisation ESA (European Space Agency) hat sich zum Ziel gesetzt, 2030 eine „Moon Village“ auf dem Mond zu errichten. Bei dieser Mondbasis soll die solare Energie genutzt werden, um Bauteile herzustellen. Hierbei ist die Messung der Strahlungsflussdichte weiterhin von großem Interesse, da die Teile durch einen Sinterungsprozess mithilfe der Sonne und dem vorhandenen Mondstaub hergestellt werden sollen (<http://regolight.eu/project-2/>). Die Entwicklung geeigneter Messtechnik ist auch in Zukunft von großem Interesse.

1.2 Gliederung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden im zweiten Kapitel die Grundlagen zu optischer Strahlung und zu den Großanlagen des Instituts für Solarforschung erläutert. Des Weiteren werden die zur Messung benötigten Komponenten unter physikalischen Aspekten betrachtet. Im dritten Kapitel werden Messungen beschrieben, die bei der Konstruktion des Fil-

terrades Einfluss nehmen. Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Konstruktion des Filterrades und wichtige Toleranzen werden genauer erläutert. Eine kurze Beschreibung des Zusammenbaus ist ebenfalls Teil des Kapitels. In Kapitel 5 ist die Wahl der Entwicklungsumgebung begründet und ausführlich die Programmierung des Filterrades beschrieben. Im letzten Kapitel werden Tests zur Funktionsweise des Filterrades erläutert.

2 Grundlagen

In den folgenden Kapiteln werden die Grundlagen vermittelt, die zur Bearbeitung der vorliegenden Masterarbeit notwendig sind. Zum einen werden Kenngrößen der optischen Strahlung erläutert, die zwei Großanlagen am Standort Köln vorgestellt und physikalische Grundlagen zu den Komponenten der Flusssichtmessung gegeben.

2.1 Kenngrößen optischer Strahlung

Optische Strahlung wird sowohl durch die Sonne, als auch durch künstliche Lichtquellen wie beispielsweise Laser oder Halogenlampen erzeugt (vgl. [Bun16]). Sie lässt sich in drei Bereiche unterteilen, der ultravioletten Strahlung, der für den Menschen sichtbaren Strahlung und der Infrarotstrahlung. Die optische Strahlung ist ein Teilbereich des elektromagnetischen Wellenspektrums, was eine Überlagerung von elektrischen und magnetischen Wellen bedeutet.

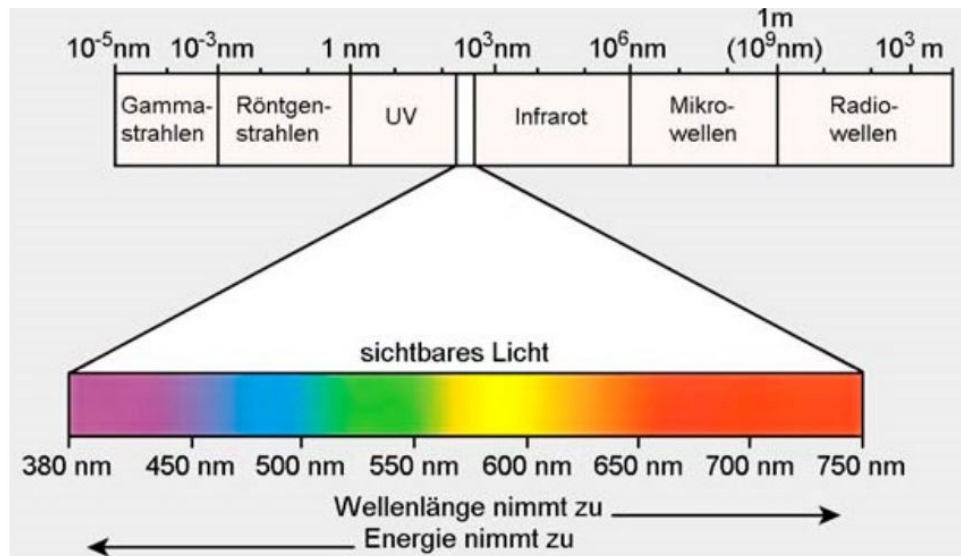


Abbildung 2.1: Elektromagnetisches Wellenspektrum [HHU16]

Die Wellenlänge des für den Menschen sichtbaren Lichts beträgt 380 nm bis 750 nm (siehe Abb. 2.1). Wie bereits oben erwähnt, besteht die optische Strahlung aus elektromagnetischen Wellen, die sich durch harmonische Schwingungen mit konstanter Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten. Die Wellenlänge λ und die Frequenz ν lassen sich in den Zusammenhang

$$\lambda \cdot \nu = c \quad (2.1)$$

bringen (vgl. [GKV89] S.150). Anhand Abb. 2.1 und Formel (2.1) lässt sich erkennen, dass die Energie mit sinkender Wellenlänge zunimmt und die Wellenlänge antiproportional zur Frequenz ist. Die für den Menschen sichtbare Strahlung ist energiereicher als Infrarotstrahlung, jedoch energieärmer als ultraviolette Strahlung. Für den weiteren Verlauf werden wichtige Kenngrößen zur mathematischen Beschreibung der optischen Strahlung eingeführt.

Tabelle 2.1: Kenngrößen optischer Strahlung (vgl. [SR15])

Größe	Einheit	Beschreibung
Strahlungsfluss ϕ	W	Strahlungsenergie pro Zeit
Strahlungsenergie Q	J	Energie einer Anzahl von Photonen
Strahlungsstärke I	W/sr	Strahlungsfluss pro Raumwinkel
Bestrahlungsstärke E	W/m^2	Strahlungsfluss pro effektiver Empfängerfläche
Spez. Ausstrahlung M	W/m^2	Strahlungsfluss pro effektiver Senderfläche
Bestrahlung H	J/m^2	Strahlungsmenge pro effektiver Empfängerfläche
Strahldichte L	$W/(m^2 sr^2)$	Strahlungsfluss pro Raumwinkel und Senderfläche

Sender- und Empfängerflächen sind jeweils Bereiche, die entweder im Falle des Senders Strahlung emittieren und im Falle des Empfängers Strahlung reflektieren oder absorbieren. Die in Tabelle 2.1 verwendeten Begriffe besitzen in unterschiedlichen Quellen andere Namen, wie

- Strahlungsfluss $\hat{=}$ Strahlungsleistung,
- Strahlungsenergie $\hat{=}$ Strahlungsmenge,
- Strahlungsstärke $\hat{=}$ Strahlstärke $\hat{=}$ Strahlungsintensität,
- Bestrahlungsstärke $\hat{=}$ Strahlungsstromdichte $\hat{=}$ Strahlungsflussdichte und
- spezifische Ausstrahlung $\hat{=}$ Ausstrahlungsstromdichte $\hat{=}$ Ausstrahlungsflussdichte.

2.2 Sonnenofen

Der Sonnenofen in Köln ermöglicht bis heute eine Vielzahl unterschiedlicher Experimente. Durch die Erzeugung von hochkonzentrierter Strahlung lassen sich Versuche in den Bereichen der solaren Chemie, Materialforschung und Komponententests für Raumfahrtanwendungen durchführen. Auf der Grundlage bereits existierender Sonnenöfen beispielsweise

der Plataforma Solar de Almeria in Spanien und erfahrenen Ingenieuren, wurde der Bau wie in Abb. 2.2 im Jahr 1994 fertiggestellt.

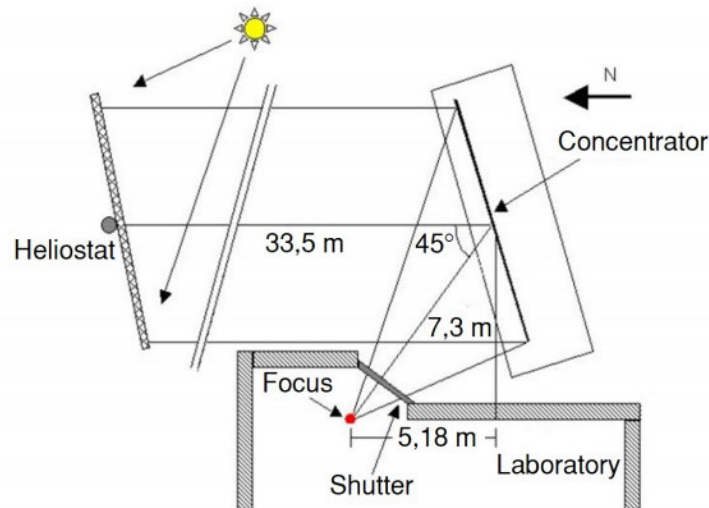


Abbildung 2.2: Skizzierter Aufbau des Sonnenofens [dlr16]

Abb. 2.2 zeigt den Umlenkspiegel (Heliostat), der das gesamte Spektrum des Sonnenlichts von 280 nm (mittlere Ultraviolettstrahlung) bis etwa $3\text{ }\mu\text{m}$ (nahe Infrarotstrahlung) auf den in $33,5\text{ m}$ entfernten Konzentrator lenkt. Da sich der Sonnenstand im Laufe des Tages aufgrund der Erdrotation um die eigene Achse und der Rotation um die Sonne ändert, muss der Heliostat dem Sonnenstand nachgeführt werden. Hierzu wurde ein Computerprogramm entwickelt, welches den Azimut- und Elevationswinkel (siehe Abb. 2.3) der Sonne standort- und zeitabhängig berechnet.

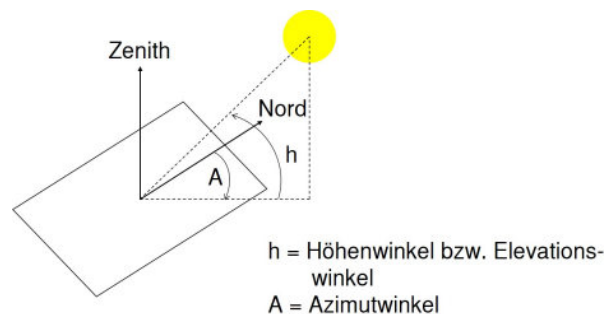


Abbildung 2.3: Skizze der Sonnenwinkel
(in Anlehnung an [SH12])

Der Konzentrator, bestehend aus 159 hexagonalen Hohlspiegeln, befindet sich in einem separaten Gebäude mit einem Rolltor, um die Spiegel vor Witterung zu schützen oder

gegebenenfalls den Strahlengang zu unterbrechen. Das konzentrierte Sonnenlicht wird in das Laborgebäude geleitet, in dem der ca. $7,3\text{ m}$ entfernte Fokus liegt (siehe Abb. 2.2). Vor dem Fokus ist ein sogenannter Shutter, der sich öffnen und schließen lässt, wodurch die Leistung regulierbar ist. Mit diesem Aufbau kann eine Gesamtleistung von 20 kW erreicht werden. Die konzentrierte Leistung beträgt allerdings $4,5\text{ MW/m}^2$ auf einer Fläche von 2 cm^2 . Die dazu notwendige direkte Strahlung (engl. Direct Normal Irradiation (DNI)) liegt bei 900 W/m^2 .



Abbildung 2.4: Foto des Sonnenofens [dlr16]

Die Abb. 2.4 zeigt den Aufbau des Sonnenofens. Rechts befindet sich der Heliostat, der das Sonnenlicht auf den Konzentrator im Gebäude links umlenkt. Der konzentrierte Strahl wird durch den Shutter in das Laborgebäude geleitet, in dem das Experiment aufgebaut ist.

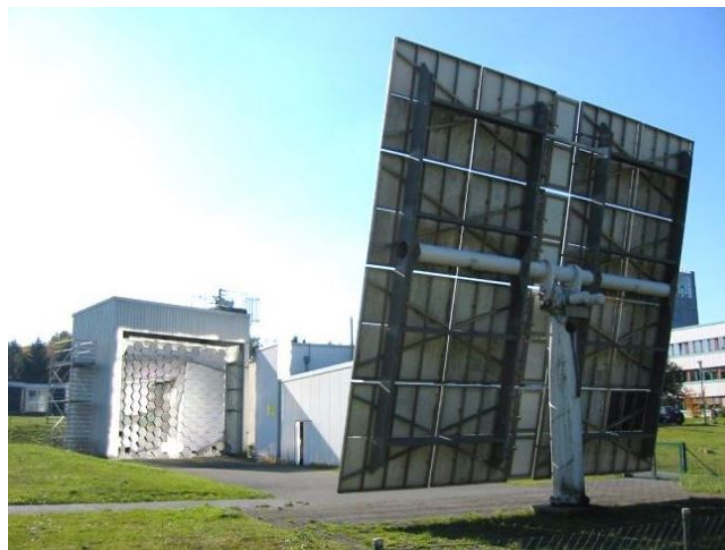


Abbildung 2.5: Foto des Heliostaten [dlr16]

In der Abb. 2.5 ist die Rückwand des Heliostaten mit den zwei Antrieben zur Verfolgung des Sonnenstandes zu sehen. Des Weiteren ist der Konzentrator mit geöffnetem Rolltor zu sehen.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass am Sonnenofen nur direkte Strahlung verwendet werden kann. Die direkte Strahlung trifft ohne Ablenkung durch Staubteilchen in der Luft oder Wettereinflüssen in der Atmosphäre auf die Erdoberfläche. Im Gegensatz dazu gibt es die diffuse Strahlung, die durch eben genannte Störfaktoren beeinflusst und in alle Richtungen gestreut wird. Dies unterscheidet die Photovoltaik, welche sowohl direkte als auch diffuse Strahlung nutzt, von der CSP-Technologie (CSP, Concentrated Solar Power).

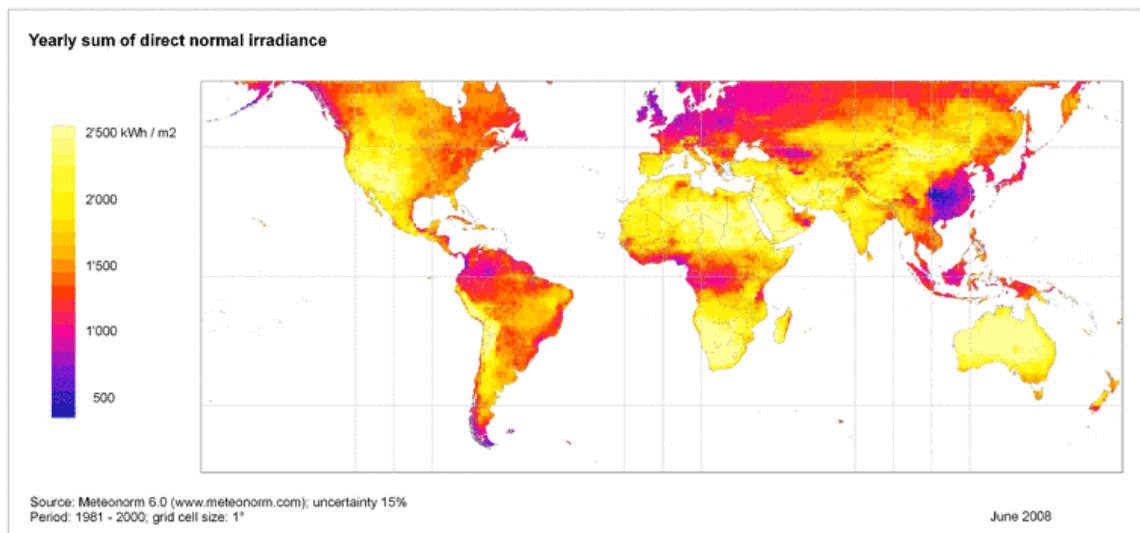


Abbildung 2.6: Mittel aus weltweiter direkter Strahlung zwischen 1981-2000
[Par16]

Die Abb. 2.6 zeigt den Mittelwert direkter Strahlung zwischen den Jahren 1981 bis 2000. Die direkte Strahlung in Deutschland ist relativ gering im Vergleich zu den Gebieten Afrika und Australien. Einige Experimente benötigen eine kontinuierliche und über einen längeren Zeitraum andauernde Bestrahlung. Dies wird am Standort Köln durch die Anlage mit 10 Hochleistungsstrahlern realisiert. Auf die Funktionsweise der Strahler wird im folgenden Kapitel eingegangen.

2.3 Hochleistungsstrahler

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, ist die direkte Sonnenstrahlung in Deutschland relativ gering und das Wetter oftmals sehr wechselhaft. Für eine zuverlässige und kontinuierliche Bestrahlung der Experimente, besitzt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt am Standort Köln einen Hochleistungsstrahler (HLS) zur Erzeugung künstlicher Solarstrahlung. Dieser besteht aus 10 Xenon-Kurzbogenlampen, die in elliptischen Reflektoren eingesetzt sind. Die dabei erzeugte Leistungsdichte beträgt ca. $4,1 \text{ MW/m}^2$ auf einer Fläche von 1 cm^2 .



Abbildung 2.7: Hochleistungsstrahler [dlr16]

Die folgende Abb. 2.8 zeigt die Seitenansicht der am Standort Köln verwendeten HLS-Lampen. Sie werden durch ein Radialgebläse luftgekühlt und sind von einem Reflektor umgeben. Die Justiereinheit wird benötigt, um die Lampen in horizontaler und vertikaler Richtung zu bewegen, da sich der Brennpunkt F1 des Ellipsoiden einer jeden Lampe durch Wärmeausdehnung verändern kann.

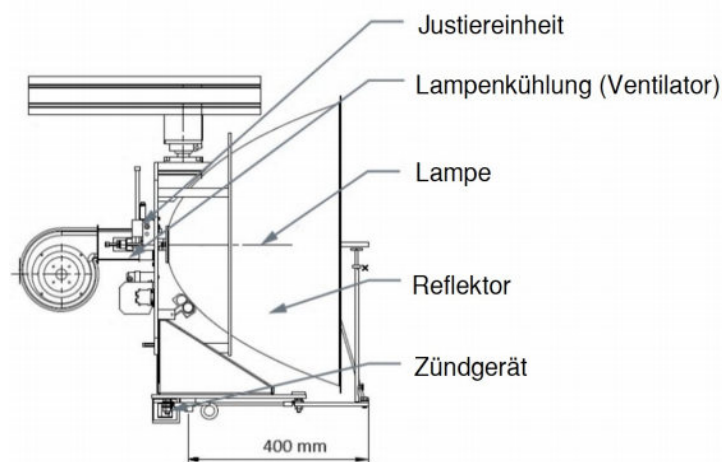


Abbildung 2.8: Seitenansicht einer HLS-Lampe [dlr16]

Die verwendeten Leuchtmittel sind Gasentladungslampen, die mit Xenongas gefüllt sind und einen Druck von 80 bar in heißem Zustand und 4-8 bar in kaltem Zustand erreichen können. Durch das Brennen eines Lichtbogens im Xenongas entsteht die künstliche Solarstrahlung. Die aus Wolfram bestehende Kathode und Anode sind wenige Millimeter voneinander entfernt. Die Kathode ist dabei kegelförmig, um den Lichtbogen in Richtung Anode zu steuern. Die Anode hingegen ist zylinderförmig und massiver gestaltet, da diese hohen Temperaturen standhalten muss. Zwischen der Kathode und der Anode entsteht durch Ionisierung des Xenon-Gases ein Plasma, welches den erzeugten Lichtbogen aufrechterhält. Der hohe Druck im Quarzglaskolben führt zur Verbreitung der Spektrallinien aufgrund der Niveaufenspaltung der aufeinanderstoßenden Teilchen, wodurch ein kontinuierliches Spektrum im sichtbaren Bereich von 380 nm bis 750 nm entsteht. Des Weiteren wird, wie auch von der Sonne, kurzwellige UV-Strahlung mit hoher Leistungsdichte erzeugt. Aufgrund des breiten Farbspektrums entsteht ein dem Tageslicht ähnliches kaltweißes Licht, weshalb diese Lampen in Kinoprojektoren, Leuchttürmen und in der Automobilbranche eingesetzt werden.

2.4 Physikalische Grundlagen

Das vorliegende Kapitel thematisiert die physikalischen Grundlagen der wichtigsten Messtechniken und den Ablauf der Strahlungsflussdichtemessung.

2.4.1 Messkamera

Die zur Strahlungsflussdichtemessung eingesetzte Kamera ist von der Firma Basler aus der Serie pilot. Sie ist in der Lage, 48 fps (frames per second) aufzunehmen und erzeugt ein monochromes 1004 px x 1004 px Bild. Der Bildsensor ist ein CCD-Sensor und misst 7,43 mm x 7,43 mm. Bildsensoren des Typs CCD (Charge Coupled Device) sind die am häufigsten eingesetzten Sensoren in der digitalen Fotografie. Der Aufwand zur Herstellung der Chips ist gering und sie sind unempfindlich gegen Rauschen. Neben den CCD-Sensoren existieren noch CMOS-Sensoren (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) und die bereits veralteten Photokathoden in Vakuumröhren.

2.4.2 Objektiv

Das Objektiv ist ein optisches System, welches unerlässlich für optische Geräte ist. Hierzu zählen beispielsweise Fotokameras, Mikroskope und Teleskope. Es besteht aus mehreren Linsen und Spiegeln, die ein reelles Abbild eines Objektes erzeugen. Wichtige Kenngrößen bei der physikalischen Betrachtung von Linsen bzw. Linsensystemen sind die Brennweite f , Bildweite b , Gegenstandsweite g , Gegenstandsgröße G und Bildgröße B (siehe Abb. 2.9).

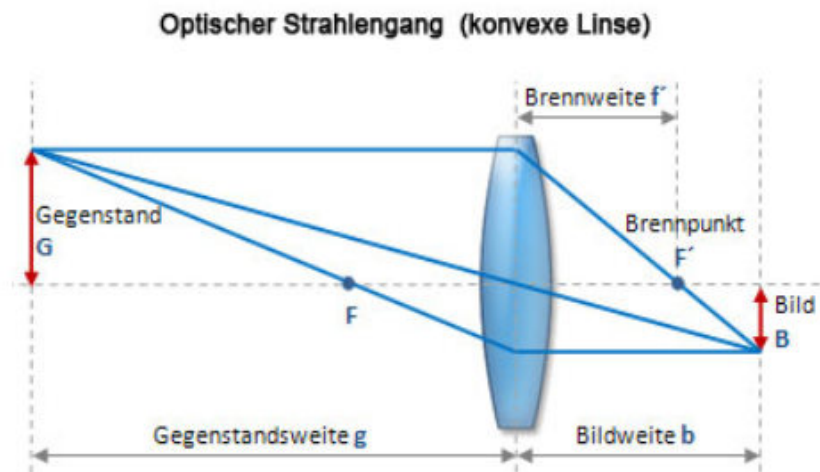


Abbildung 2.9: Kenngrößen von Linsen [Vis16]

Die Brennweite ist abhängig von der Bildweite und der Gegenstandsweite. Sie lässt sich berechnen durch

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} . \quad (2.2)$$

Zwischen der Gegenstandsgröße und Bildgröße besteht im Bezug auf Gegenstandsweite und Bildweite der Zusammenhang

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} . \quad (2.3)$$

Es existieren unterschiedlichste Arten von Objektiven. In der Fotografie wird zwischen Weitwinkel-, Normal- und Teleobjektiv unterschieden.

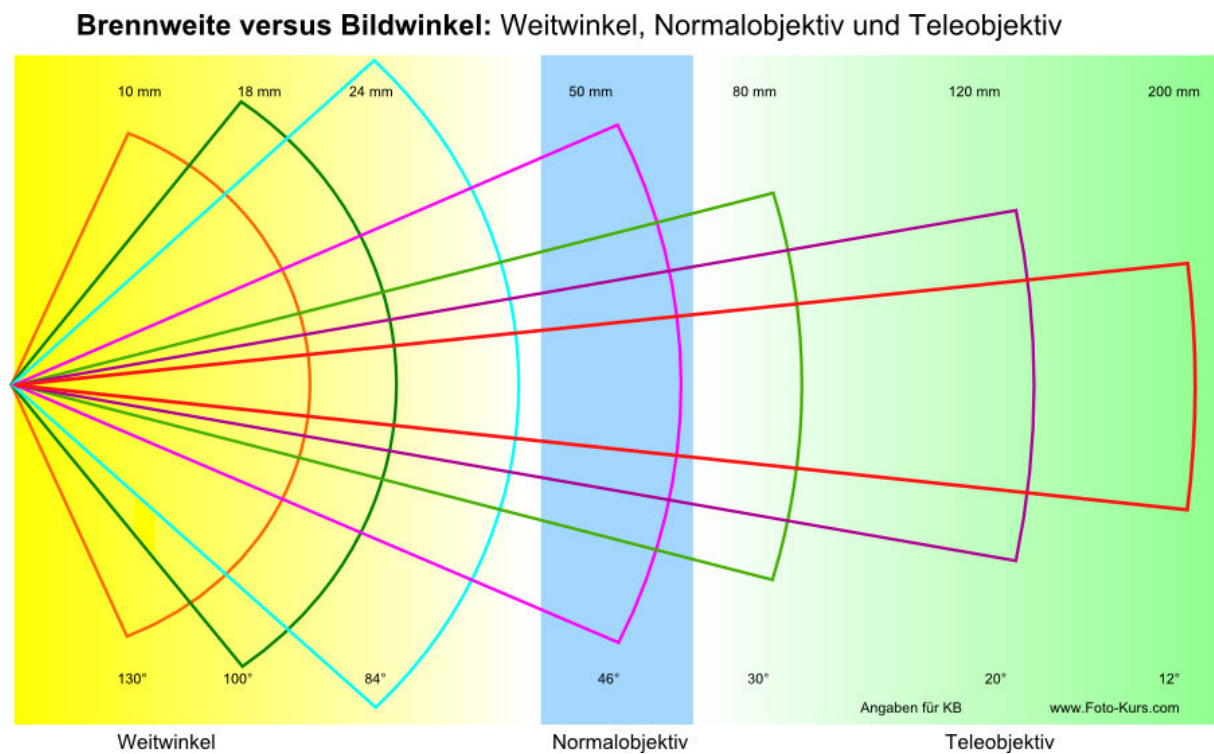


Abbildung 2.10: Bildwinkel und Brennweite von Weit-, Normal- und Teleobjektiven
[Pra16]

Wie anhand der Abb. 2.10 zu erkennen ist, sind Weitwinkelobjektive für Aufnahmen geeignet, bei denen ein Fotograf einen möglichst breiten Bildausschnitt eines Motivs erhalten möchte. Wird hingegen ein Teleobjektiv verwendet, kann ein Objekt in großer Entfernung noch mit hoher Qualität aufgenommen werden und der Bildausschnitt ist entsprechend klein. Damit das Objektiv bei variierender Objektentfernung nicht ständig gewechselt werden muss, existieren neben Festbrennweiten-Objektiven auch Zoom-Objektive, die einen Bereich von Brennweiten abdecken. Besitzt ein Zoom-Objektiv beispielsweise einen Brennweitenbereich von 18 mm bis 50 mm, ist es als Weitwinkel- und Normalobjektiv einsetzbar.

Das Objektiv ist hauptverantwortlich, welches Bild auf dem Chip der Kamera abgebildet wird. Es lässt sich nahezu jedes Objektiv für jeden Kamerachip einsetzen. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass der Anschluss des Objektives an die Kamera eventuell durch einen Adapter ermöglicht werden muss und die Chipgröße über den Bildausschnitt entscheidet.

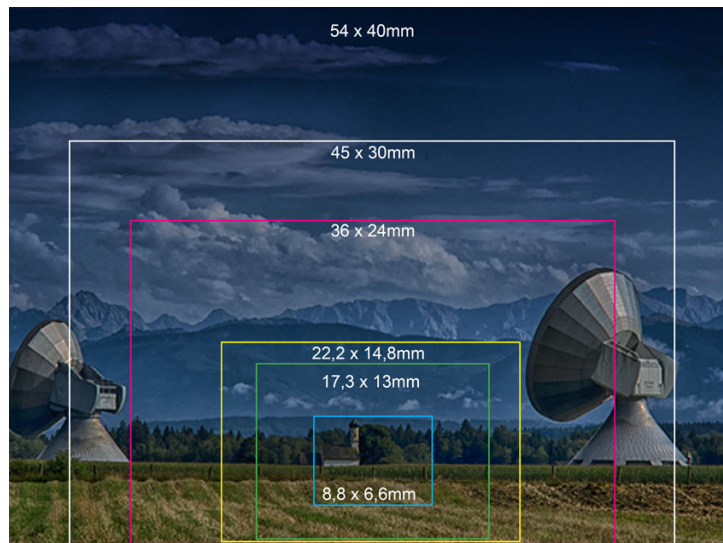


Abbildung 2.11: Bildausschnitte abhängig vom Sensorformat
[Pro16] [27.10.2016]

Bei der Verwendung des gleichen Objektives entstehen unterschiedliche Bildausschnitte (siehe Abb. 2.11). Daher kann mit einem Normal-Objektiv für Vollformatchips bei kleinen Chips eine Telefunktion erreicht werden.

2.4.3 Neutraldichtefilter

Optische Filter dienen sowohl der Transmission, als auch der Absorption von Wellenlängen oder Wellenlängenbereichen. Einsatzbereiche von optischen Filtern sind Bildverarbeitungsanwendungen, wie sie auch in dieser Arbeit eingesetzt werden, in Fluoreszenzmikroskopen, die in der Biologie zur Visualisierung von lebenden Zellen und Gewebe eingesetzt werden oder auch in der klinischen Chemie. Bei der hier beschriebenen Flussdichtemessung werden im speziellen Neutraldichtefilter, auch genannt Graufilter, Neutralfilter oder kurz ND-Filter verwendet. Sie dienen dazu, das auf den Kamerasensor einfallende Licht abzuschwächen und damit vor Beschädigungen des Sensors oder anderen optischen Komponenten zu schützen. Neutraldichtefilter sind mit unterschiedlicher Durchlässigkeit (Transmission) erhältlich und homogen, damit das Bild und das Messergebnis nicht verfälscht

werden. Der nicht transmittierte Lichtteil wird durch die Filter absorbiert oder reflektiert. Zwischen der Neutraldichte x und der Transmission τ besteht der logarithmische Zusammenhang

$$x = \lg\left(\frac{1}{\tau}\right) = \lg(\tau^{-1}) = -\lg(\tau) \Leftrightarrow \tau = 10^{-x} . \quad (2.4)$$

Die Transmission ist dabei der Quotient aus der gefilterten Strahlungsintensität und der ursprünglichen Intensität angegeben in %. Besitzt ein optischer Filter beispielsweise die Dichte 4, so ist die Transmission $10^{-4} = 1/10.000 = 0,0001$ also 0,01 %. Das heißt der Bildsensor nimmt die fotografierte Szene 10.000-fach dunkler wahr, als sie in der Realität ist. Neutraldichtefilter gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Sie unterscheiden sich in der Größe und in der Eigenschaft, nämlich reflektierend, nicht reflektierend und absorbierend.

2.4.4 Strahlungsflussdichtemessung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die grundsätzlichen Komponenten zur optischen Strahlungsflussdichtemessung vorgestellt. In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, was die Strahlungsflussdichte charakterisiert und wie die Messung durchgeführt wird.

Zunächst wird der Begriff Strahlungsenergie Q eingeführt. Die Strahlungsenergie Q ist die Energie, die eine bestimmte Anzahl Photonen besitzen. Wenn die Strahlungsenergie innerhalb einer Zeitspanne gemessen wird, erhält man den Strahlungsfluss ϕ . Die Strahlungsflussdichte ergibt sich aus der Verteilung des Strahlungsflusses auf einer Fläche. Ein Beispiel zur Erläuterung folgt nach der Erklärung zur Messung der Strahlungsflussdichte. Zur optischen Messung der Strahlungsflussdichte ist zusätzlich zur Messkamera, ND-Filter und Objektiv eine Lambert'sche Oberfläche und ein Sensor zur Flussdichtemessung notwendig. Eine Lambert'sche Oberfläche ist wichtig, da sie die einfallenden Strahlen in alle Richtungen homogen reflektiert, ohne die Strahlungsstärke zu beeinflussen. Dies ist für die Messung von Bedeutung, da die Messkamera nicht in der optischen Achse platziert ist. Der Sensor zur Flussdichtemessung ist ein Gardon-Radiometer, welches in Abb. 2.12 dargestellt ist.

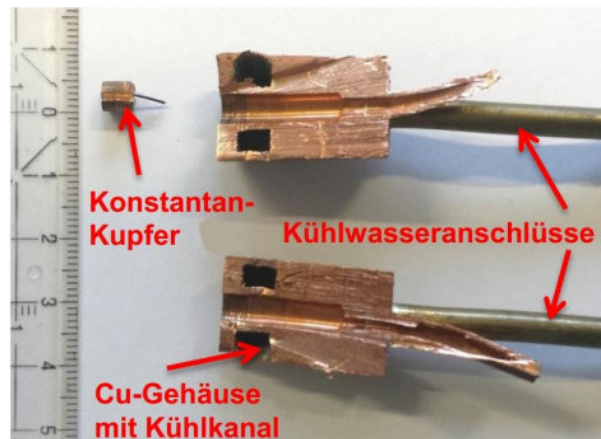


Abbildung 2.12: Gardon Radiometer (Schnitt) [dlr16]

Im Schnittbild ist die Kühlkammer zu sehen, die als Wärmesenke für die Strahlungsenergie dient. Diese Kühlkammer wird mithilfe von Kühlwasseranschlüssen mit Wasser durchspült. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Kupfer reagiert der Sensor sehr schnell auf wechselnde Strahlungsflussdichten. Das Konstantan-Kupfer Thermoelement besteht aus einer Konstantanfolie, die mit dem Kupferdraht verbunden ist. Die Front des Sensors ist komplett schwarz lackiert, damit möglichst die gesamte Strahlung absorbiert wird. Durch den Temperaturunterschied zwischen dem Konstantan-Kupfer-Element und dem Kupfergehäuse entsteht eine Spannung, die sogenannten Seebeck-Spannung. Die Spannung im mV - Bereich wird mit einem Kalibrierfaktor, der zuvor meist durch den Hersteller festgelegt wird, multipliziert und ergibt die Strahlungsflussdichte.

Zur optischen Messung der Strahlungsflussdichte wird zunächst das Target (Lambert'sche Oberfläche), versehen mit 4 Passpunkten, vermessen und in FMAS eingetragen. Durch die 4 Passpunkte lässt sich bei der späteren Auswertung des Kamerabildes das Bild entzerren, sofern die Kamera nicht in der optischen Achse platziert ist. Die 4 Passpunkte dienen auch der Skalierung zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem. Da der Abstand in einer echten Einheit (z. B. cm) der Punkte bekannt ist und gleichzeitig die Pixelkoordinaten im Bild bekannt sind, können alle Bildmaße in cm abgeleitet werden. Außerdem wird eine Pixelmatrix erzeugt, die auf der sensitiven Fläche des Gardon-Radiometers liegt, um nach dem Einmessen einen Durchschnittsgrauwert als Referenz zu haben. In Abb. 2.13 ist der 1. Schritt schematisch dargestellt.

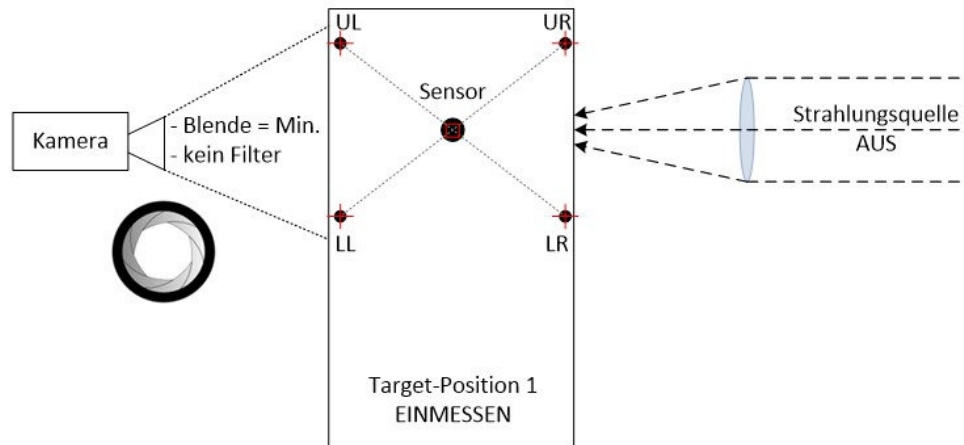


Abbildung 2.13: 1. Schritt Strahlungsflussdichtemessung [The16]

Nachdem die Passpunkte und die Pixelmatrix festgelegt wurden, wird das Target durch den Sonnenofen bzw. den Hochleistungsstrahler bestrahlt. Das Gardon Radiometer misst die Strahlungsflussdichte und der Wert wird dem Durchschnittsgrauwert der Pixelmatrix, aufgenommen durch die Kamera, zugeordnet (siehe 2.14).

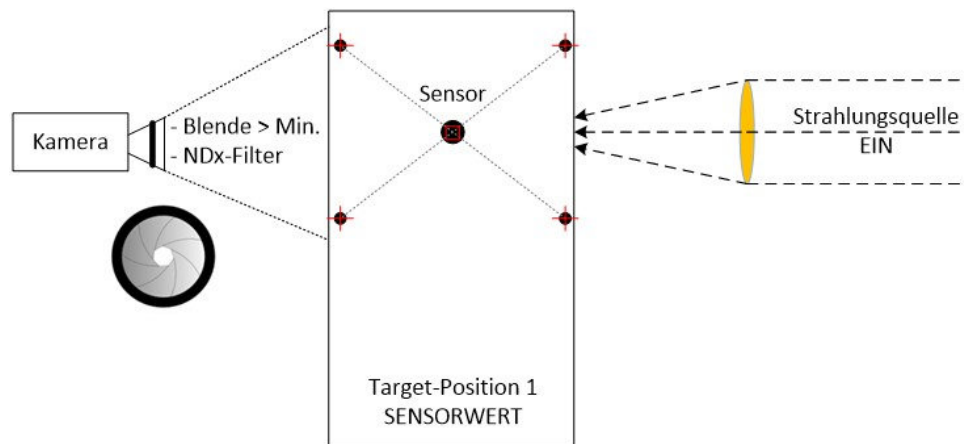


Abbildung 2.14: 2. Schritt Strahlungsflussdichtemessung [The16]

Im letzten Schritt wird das Target mit dem Sensor verschoben. Die Messkamera nimmt 32 Bilder auf und wertet diese mithilfe von Korrekturen aus (siehe 2.15)

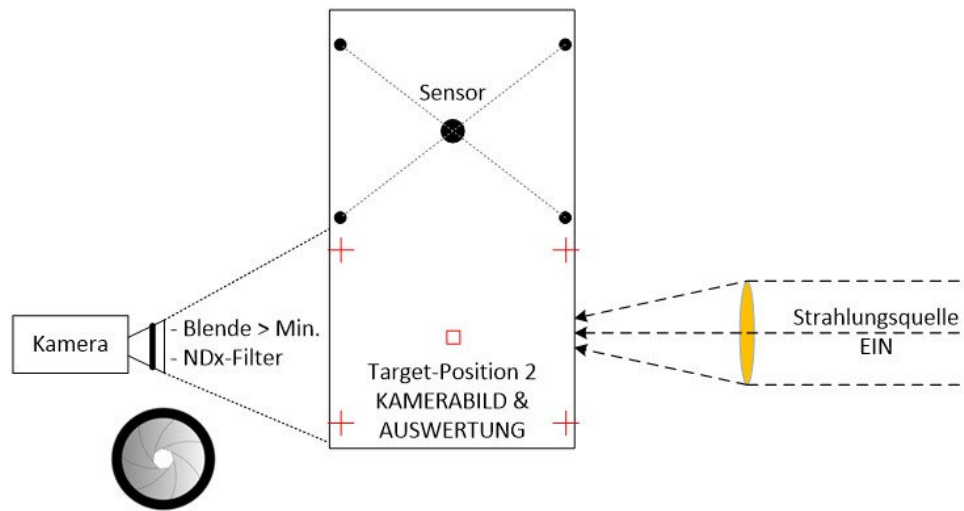
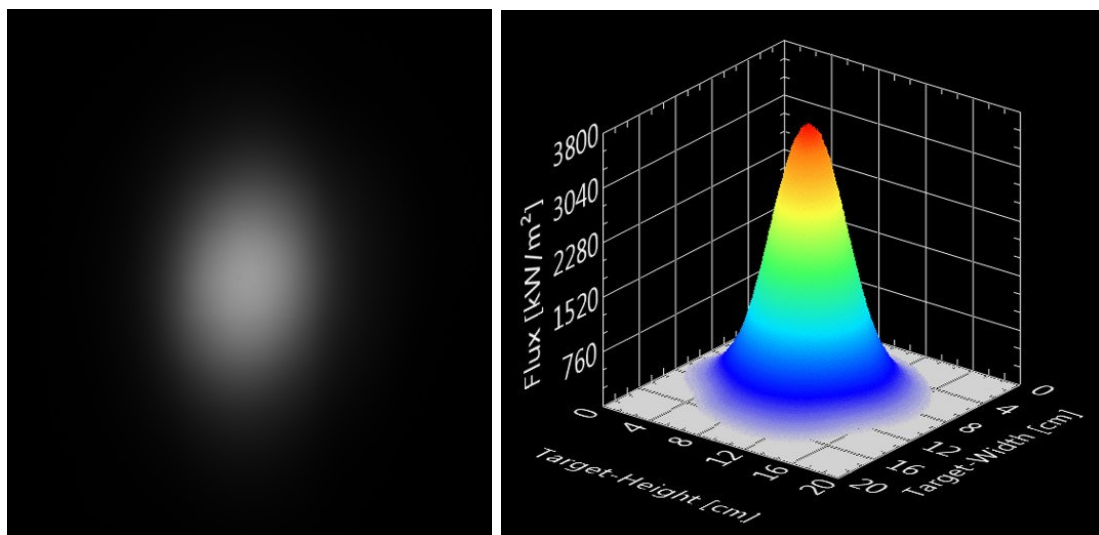


Abbildung 2.15: 3. Schritt Strahlungsflussdichtemessung [The16]

Damit ist die Messung der Strahlungsflussdichte abgeschlossen. Als Ergebnis ergibt sich eine Gaußverteilung der Strahlungsflussdichte wie im Beispiel in Abb. 2.16.



(a) Kamerabild

(b) Strahlungsflussdichteverteilung

Abbildung 2.16: Messbild und Auswertung [dlr16]

3 Messungen

3.1 Objektivwahl und ND-Filtergröße

Das Ziel einer Neukonstruktion des Filterwechselsystems ist eine kompakte Bauweise und die Möglichkeit der örtlichen Verlagerung. Zur Realisierung einer kompakten Bauweise wird in diesem Kapitel überprüft, ob Filter mit einem Durchmesser von 12,5 mm eingesetzt werden können. Hierbei muss allerdings untersucht werden, ob der geringe Durchmesser das Messergebnis beeinflussen könnte. Als Alternative sind Neutraldichtefilter mit einem Durchmesser von 25 mm erhältlich. Ein Consumer-Objektiv hat am Bajonettanschluss (chipnahes Ende) einen Durchmesser von mindestens 20 mm. Werden Filter zwischen Kamerachip und Objektiv mit einem Durchmesser von 12,5 mm eingesetzt, wird bereits deutlich, dass nicht das gesamte Bild durch den Filter auf dem Chip abgebildet werden kann. Das getestete Zoom-Objektiv der Firma Canon mit einer Brennweite von 18-55 mm besitzt horizontale Öffnungswinkel von 64,5° bis 23,3° und vertikale Öffnungswinkel von 45,5° bis 15,6°. Die horizontalen Winkel unterscheiden sich von den vertikalen Winkeln, da das Objektiv für einen rechteckigen Fotochip ausgelegt ist. Aufgrund der Rotationssymmetrie ist der Bildausschnitt kreisförmig. Da der Hersteller dazu jedoch keine Angaben zur Verfügung stellt, wird zunächst von einem rechteckigen Ausschnitt ausgegangen. Der Versuch wurde mit einem Consumer-Objektiv durchgeführt, da dieses kostengünstiger als ein Messobjektiv ist und das Auflagemaß von 44 mm genug Raum bieten würde, um das Filterradd zwischen Objektiv und Messkamera zu platzieren. Die Gegenstandsweite im Hochleistungsstrahler beträgt 4000 mm, was bei einer Brennweite von 18 mm und Öffnungswinkeln von 64,5° horizontal und 45,5° vertikal einen rechteckigen Bildausschnitt mit den Maßen

$$G_{hor.} = 2 \cdot \tan(32,25^\circ) \cdot 4000 \text{ mm} = 5047,62 \text{ mm} ,$$

$$G_{vert.} = 2 \cdot \tan(22,75^\circ) \cdot 4000 \text{ mm} = 3354,68 \text{ mm}$$

ergibt. Da am Objektivausgang durch die Rotationssymmetrie ein kreisförmiger Bildausschnitt erscheint, wird im folgenden ein Kreis angenommen, der in dem rechteckigen Ausschnitt liegt und alle Kanten tangiert (siehe Abb. 3.1).

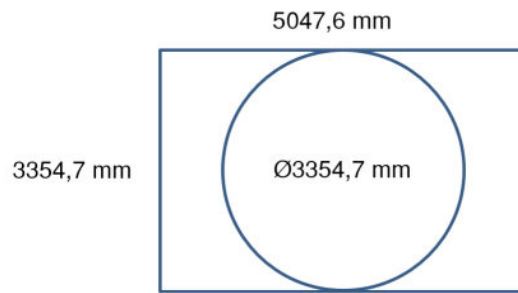


Abbildung 3.1: Bildkreis

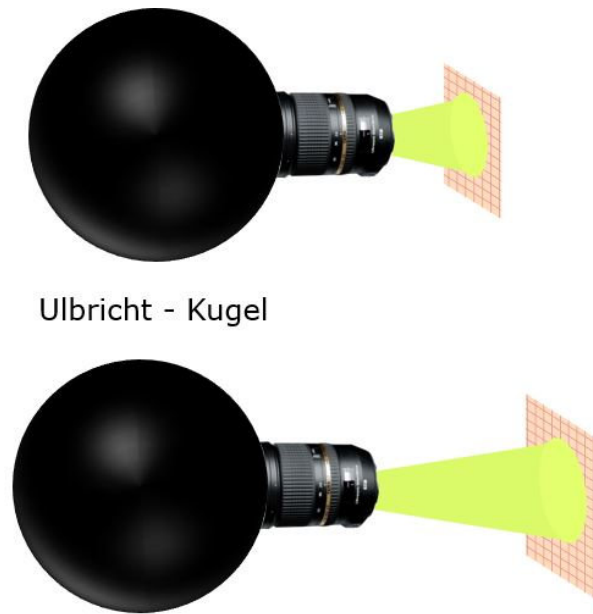
Das Target, welches in 4000 mm Entfernung platziert wird, hat eine Kantenlänge von $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$. Das Verhältnis der Kantenlänge des Targets zum Durchmesser des Kreises lässt sich berechnen zu

$$A_{\text{Target}} = \frac{500 \text{ mm}}{3354,68 \text{ mm}} = 0,149 .$$

Mit dem bekannten Verhältnis lässt sich nun die Kantenlänge des Targets auf dem Kreis des Objektivausgangs berechnen. Der Durchmesser des Bildkreises beträgt beim getesteten Objektiv 20 mm . Das Target hat bei diesem Durchmesser eine Kantenlänge von

$$l = 0,149 \cdot 20 \text{ mm} = 2,98 \text{ mm} .$$

Das Bild am Objektivausgang wird mit steigendem Abstand kegelförmig vergrößert. Da der Hersteller keine Angaben zur Vergrößerung des Bildkegels liefert, muss ein weiterer Versuch herangezogen werden. Mithilfe einer Ulbricht-Kugel lässt sich gerichtete Strahlung von einer Lichtquelle in eine diffuse Strahlung überführen, wodurch sich eine gleichmäßige Beleuchtung erreichen lässt (vgl. [Kuc91] S.393f). Das Objektiv wird an der Ulbricht-Kugel befestigt und die Lichtquelle in der Kugel eingeschaltet. Durch Messen des Kreisdurchmessers hinter dem Objektiv mit zwei unterschiedlichen Abständen lässt sich die Steigung des Lichtkegels berechnen.



Ulbricht - Kugel

Abbildung 3.2: Versuch mit Ulbrichtkugel

Beim eingesetzten Objektiv ergibt sich eine Steigung von $m = 0,275$. Das Auflagemaß gibt an, in welchem Abstand das Objektivende zum Kamerachip entfernt sein muss. Bei EF-Objektiven ist dieser Abstand 44 mm . Der Kreisdurchmesser des Bildes beträgt

$$d_{\text{Lichtkreis}} = 0,275 \cdot 44 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 32,1 \text{ mm}$$

bei 44 mm Abstand von Objektiv bis zum Kamerachip. Mithilfe des Verhältnisses kann die Kantenlänge des Targets auf dem Kamerachip bestimmt werden zu

$$l_{\text{Chip}} = 0,149 \cdot 32,1 \text{ mm} = 4,783 \text{ mm} .$$

Der Chip der Messkamera piA1000-48gm der Firma Basler besitzt die Maße $7,43 \text{ mm} \times 7,43 \text{ mm}$. Das Target hat jedoch nur eine Kantenlänge von $4,783 \text{ mm}$, wird also vollständig auf dem Chip abgebildet. Des Weiteren ist mit dieser Rechnung nachgewiesen, dass Neutradichtefilter mit einem Durchmesser von $12,5 \text{ mm}$ vollkommen ausreichend sind, da die Kantenlänge des Targets maximal $4,783 \text{ mm}$ beträgt.

3.2 Bestimmung der Doppelreflexion

In diesem Kapitel geht es um die Bestimmung der Doppelreflexion. Dies ist insofern wichtig, als dass es den Einbau der Filter beeinflusst. Werden die Filter direkt aneinander

in das Filterrada eingesetzt, kann es zu einer Doppelreflexion führen, die das Messergebnis negativ beeinflussen könnte, indem es ungenau wird. Als Lösung für dieses Problem bietet es sich an, die Filter gegeneinander zu verkippen. Um dies zu untersuchen, wurde eine Spektralanalyse mithilfe des Spektralphotometers Lambda 950 der Firma PerkinElmer (vgl. [Per16]) durchgeführt. Mit diesem Gerät können elektromagnetische Wellen im Längenbereich von 175 nm bis 3300 nm erzeugt werden. Der Aufbau des Lambda 950 ermöglicht vielseitige Messungen, unter anderem die Transmissionsmessung von Neutraldichtefiltern, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurde. Hierzu wurden zunächst vier einzelne Filter in das Gerät eingesetzt. Da die Neutraldichte der Filter anfangs unbekannt war, konnte mit diesem Versuch diese ebenfalls bestimmt werden. Um mögliche Messfehler zu verringern, wurde jede Messung dreifach durchgeführt, sodass ein Mittelwert ermittelt werden konnte.

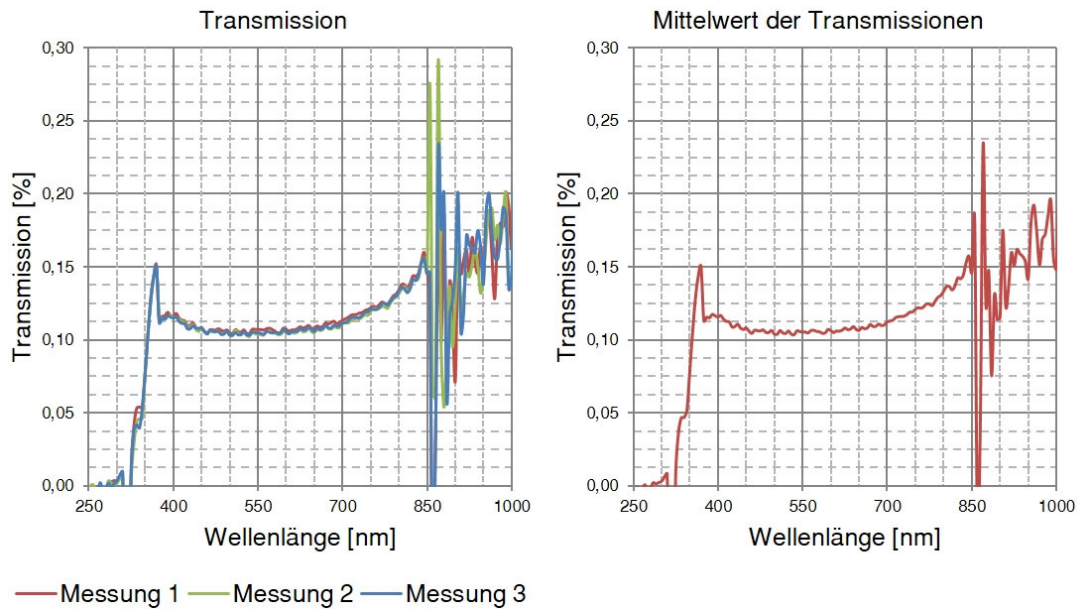


Abbildung 3.3: Transmission des Neutraldichtefilters 1

Die in Abb. 3.3 dargestellten Messungen lassen eine Eignung des Filters für die Wellenlängen von 400 nm bis 700 nm annehmen. Außerhalb dieses Bereiches gibt es viele Störungen und hohe Abweichungen. Die Transmission schwankt in dem geeigneten Bereich zwischen $0,1 \%$ und $0,125 \%$, was einer Neutraldichte von 3 entspricht. Dies lässt sich ebenfalls, wie bereits erwähnt, rechnerisch bestimmen durch

$$ND = \lg \left(\frac{1}{0,001} \right) = 3 .$$

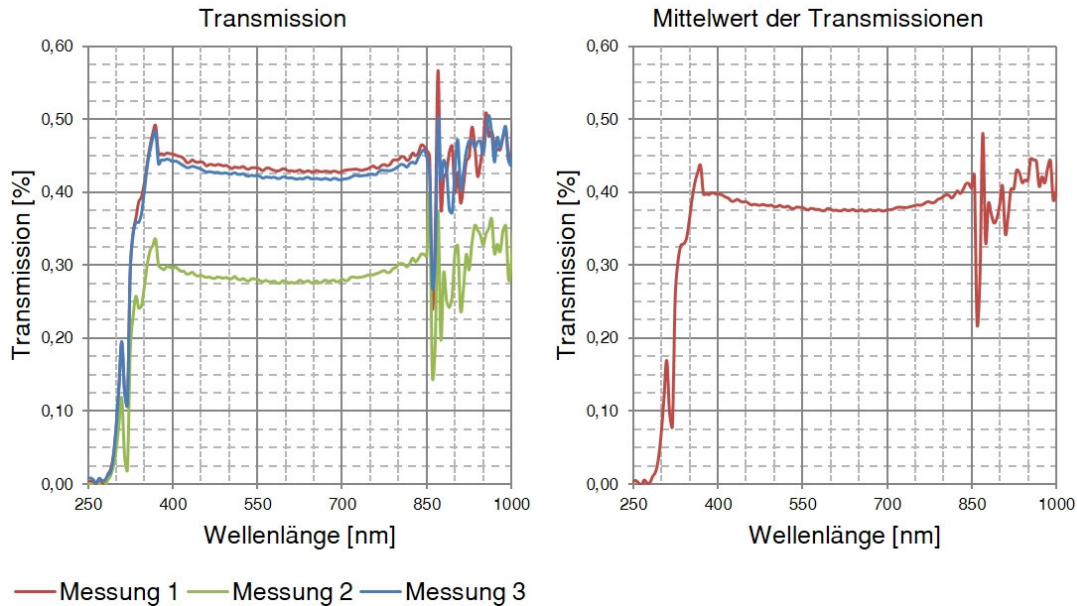


Abbildung 3.4: Transmission des Neutraldichtefilters 2

Bei der Messung des Neutraldichtefilters 2 (siehe Abb. 3.4) unterscheidet sich ein Graph stark von den übrigen zwei Graphen. Dieser schwankt zwischen 0,275 % und 0,3 % Transmission. Bei den zwei anderen Messungen liegt die Transmission zwischen 0,41 % und 0,45 %. Bei der Bestellung der Filter war kein Exemplar mit einer Transmission in diesem Bereich vorhanden, weshalb der einzelne Graph die wahre Messung sein muss. Demnach würde der Filter die optische Dichte von 2,5 besitzen. Da die Intensität des zur Messung genutzten Leuchtmittels nicht ausreichen würde, um eine Messung mit den zwei bereits vorgestellten Filtern in einer Kombination zu bestimmen, werden diese nicht weiter untersucht.

Die zwei im folgenden betrachteten Filter besitzen eine eher schwache optische Dichte. Anhand der Abb. 3.5 ist zu erkennen, dass bei der Messung der Transmission des dritten Filters, diese zwischen 20 % und 22,5 % schwankt. Das entspricht einer Neutraldichte von 0,7. In Abb. 3.6 liegt die Transmission zwischen 12,75 % und 14,25 %, was einer optischen Dichte von 0,9 entspricht.

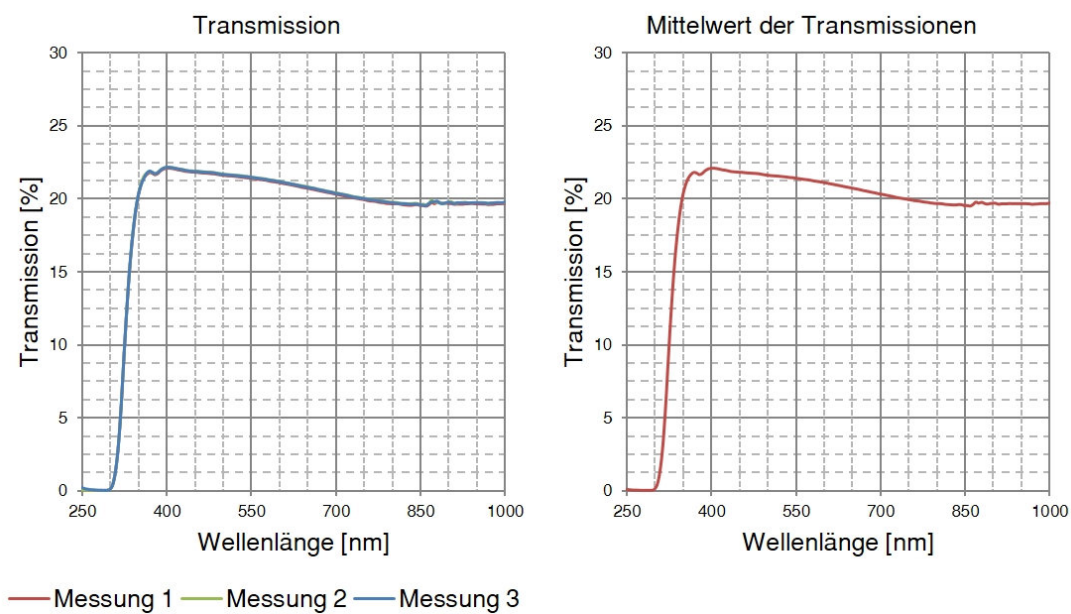


Abbildung 3.5: Transmission des Neutraldichtefilters 3

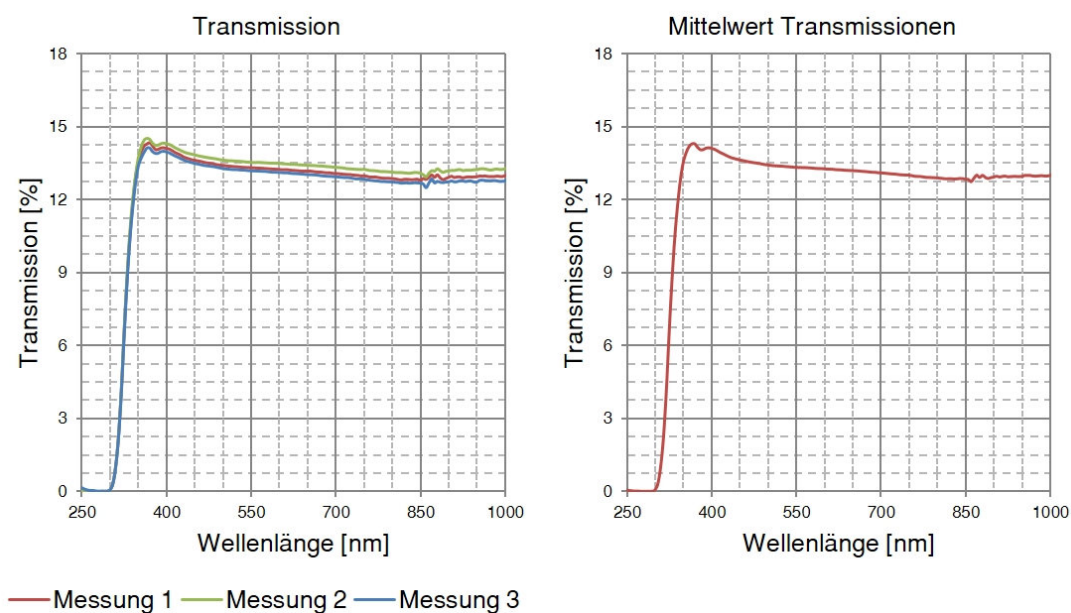


Abbildung 3.6: Transmission des Neutraldichtefilters 4

Nachdem die optischen Dichten der Filter bekannt sind, wird eine Messreihe mit einer Kombination der Filter durchgeführt. Wie bereits oben erwähnt, werden aufgrund der geringen Intensität die Filter drei und vier für diesen Versuch verwendet. Der Versuch setzt sich aus mehreren Einzelversuchen zusammen. Die erste Versuchsreihe wird so durchgeführt, dass der Filter mit der höheren Transmission, also der geringeren optischen Dichte näher an der Lichtquelle ist. Die Filter werden dann in 4 Versuchsreihen mit unterschiedlichen Winkeln gegeneinander verkippt. Bei der zweiten Messreihe wird der Filter mit der geringeren Transmission, also der höheren optischen Dichte, näher an die Lichtquelle angeordnet. Anschließend werden ebenfalls die 4 Versuchsreihen mit den gleichen Winkeln durchgeführt.

Bei der Kombination mit den Filtern der Dichte 0,9 und 0,7 entsteht eine optische Dichte von 1,6. Die Transmission, die zu erwarten ist, beträgt hierbei ca. 2,5 %. Der Versuch soll deutlich machen, ob eine Verkipfung notwendig ist und in welcher Reihenfolge die Filter, ausgehend von der Licht- bzw. Strahlungsquelle, angeordnet werden müssen.

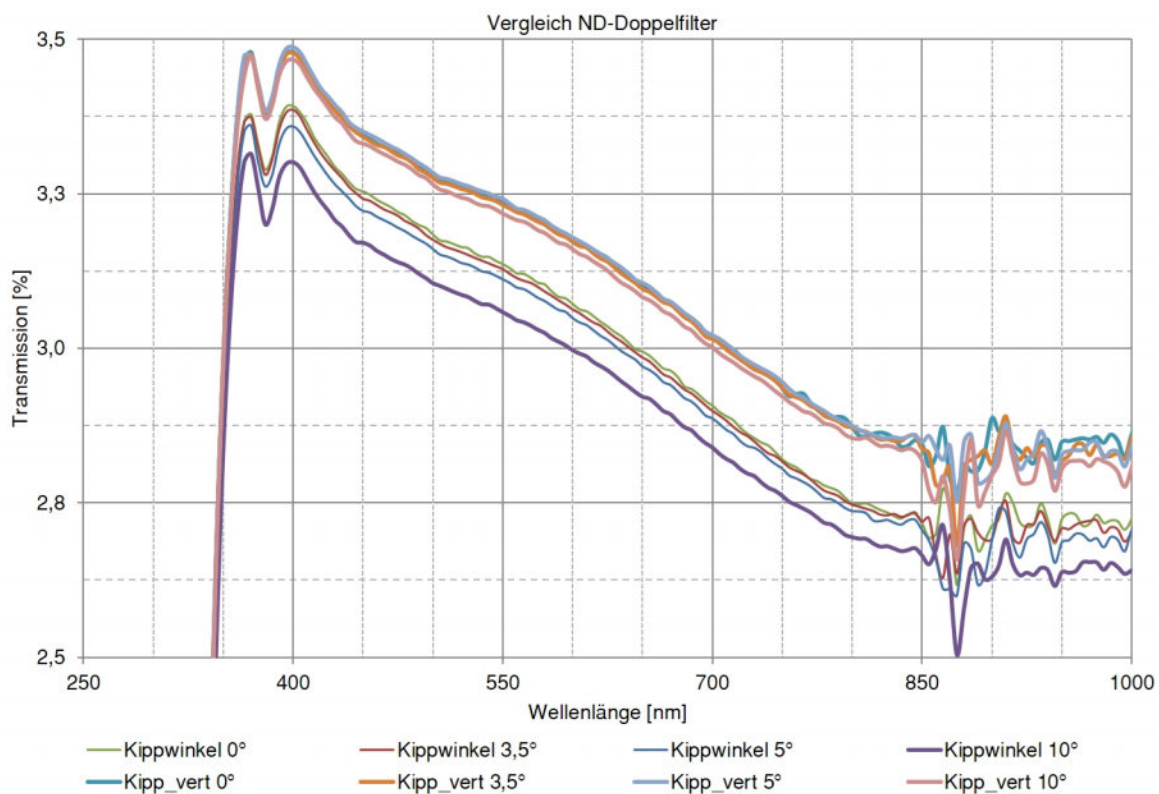


Abbildung 3.7: Transmission der Filterkombination mit und ohne Verkippen

In Abb. 3.7 sind die Graphen zum oben beschriebenen Versuch aufgeführt. Die Benennung Kipp_vert. steht für die Anordnung der Filter. Bei dieser Benennung wurde der stärkere

Filter näher zur Lichtquelle platziert. Während des Versuches wurden Verkippungen mit den Winkeln 0° , $3,5^\circ$, 5° und 10° eingestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Graphen oberhalb den erwarteten 2,5 % Transmission liegen. Selbst bei der Berücksichtigung der ± 5 %igen Toleranz für die optische Dichte, wäre der zu erwartende Wert 3,0 % und wird überschritten.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass alle Graphen der Messreihe mit dem „stärkeren“ Filter oberhalb der Graphen mit dem „schwächeren“ Filter näher an der Lichtquelle angeordnet liegen. Es lässt sich also feststellen, dass die Filter von der Strahlungs- bzw. Lichtquelle ausgehend mit steigender optischen Dichte angeordnet werden sollten.

Des Weiteren lässt sich feststellen, dass der Winkel der Verkippung Einfluss auf die Transmission hat. Zwischen den Winkeln 0° , $3,5^\circ$ und 5° ist der Unterschied verschwindend gering. Bei einem Winkel von 10° ist jedoch ein deutlicher Unterschied von ca. 0,1 % Transmission erkennbar. Dieser Unterschied lässt darauf schließen, dass eine mögliche Doppelreflexion verringert wird. Denn hier liegt der durchschnittliche Transmissionswert am nächsten zu dem erwarteten Wert.

4 Konstruktion Filterrads

Das folgende Kapitel veranschaulicht die Anforderungen an das Filterrads, drei mögliche Konstruktionen und die Beschreibung der Einzelkomponenten für die ausgewählte Konstruktion.

4.1 Aufgabe des Filterrades

Am Sonnenofen und am Hochleistungsstrahler des Institutes für Solarforschung in Köln werden zu Forschungszwecken solare Experimente durchgeführt. Durch den Aufbau der zwei Großanlagen lassen sich Strahlungsflussdichten von bis zu $4,5 \text{ MW/m}^2$ erreichen. Um die eingestrahlte Leistung zu bestimmen, ist es erforderlich die Strahlungsflussdichte zu messen. Hierfür wird am Standort Köln eine monochrome Messkamera eingesetzt, die Bilder mit der Informationsmenge von 8-Bit/pixel erzeugt, was 256 Graustufen entspricht. Da an den Großanlagen zur Messung der konzentrierten Strahlung ein weißes Target benutzt wird, ist die Intensität um ein Vielfaches höher, als die des Tageslichts. Die solare Direktstrahlung beträgt am DLR-Standort Köln bis zu 900 W/m^2 und wird durch den Konzentrator bis zu 5000-fach konzentriert. Da sich die Strahlung am Sonnenofen durch die Änderung der Shutteröffnung und dem Variieren der Konzentratorspiegelanzahl über einen weiten Bereich beeinflussen lässt, genügt es nicht, einen Filter zum Abdunkeln einzusetzen. Hinzu kommt, dass während eines laufenden Experimentes durch hohe Sicherheitsmaßnahmen aufgrund einer möglichen Strahlungsexposition es nicht erlaubt ist, den Versuchsraum zu betreten. Die Anlage muss zum Wechsel des Filters in einen Ruhezustand überführt werden, bevor der Filter ausgewechselt werden kann. Dies erfordert sowohl das Schließen des Rolltores vor dem Konzentrator, als auch das Schließen des Shutters.

Die Konstruktion eines Filterwechselsystems, welches vollautomatisiert den geeigneten Filter in den Strahlengang zur Messung einführt, ist daher von hohem Interesse. Die Anforderungen an das Filterrads ergeben sich bei der genauen Betrachtung des Messaufbaus. Aufgrund des Einsatzes an mehreren Großanlagen sollte das Filterwechselsystem möglichst kompakt konstruiert werden und zugleich eine örtliche Verlagerung möglich sein. Durch den breiten Leistungsbereich sollte es jederzeit möglich sein, durch geeignete Filterkombinationen ausreichend genaue Messergebnisse zu erzielen. Dies wird erreicht, indem eine Filterkombination gewählt wird, die das Übersteuern des Kamerachips verhindert und eine maximalen Grauwert unter 255 ermöglicht. Die daraus resultierende Gaußkurve sollte oben nicht flach begrenzt sein, da das Bild ansonsten zu hell wäre und unten sauber auf 0 auslaufen, ansonsten wäre das Bild zu dunkel. Ein weiterer Aspekt ist, dass der Filterwechsel schnell stattfinden soll, da eine Übersteuerung des Kamerachips ein

unbrauchbares Bild erzeugen würde.

4.2 Entwurf

Im vorliegenden Kapitel geht es um drei verschiedene Entwürfe, bei denen speziell Wert darauf gelegt wurde, unterschiedliche Antriebsarten zu benutzen. In erster Linie wurde sich an bereits existierenden Systemen orientiert und entsprechend der Anforderungen an ein Filterradd angepasst.

4.2.1 Phoropter

Der erste Entwurf entstand in Anlehnung an den vom Augenarzt bzw. Optiker benutzten Phoropter zur Sechstärkenbestimmung.



Abbildung 4.1: Phoropter [Bio16] [25.07.2016]

Hierbei kann der Benutzer des Phoropters der Testperson verschiedene Optiken vor das Auge setzen, um die Sehschwäche festzustellen. Im Falle des Filterraddes könnte die Konstruktion wie in Abb. 4.2 aussehen.

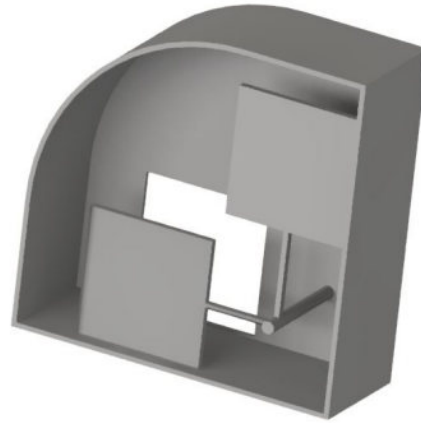


Abbildung 4.2: Phoropter-Entwurf

Die Abb. 4.2 zeigt eine Schnittdarstellung des Gehäuses, in der sich die rechteckigen Filter befinden. Durch eine intelligente Steuerung werden die benötigten Filter in den Strahlengang gedreht und ermöglichen somit genaue Messungen. Diese Art der Konstruktion bringt Vorteile hinsichtlich der Geschwindigkeit der Filterverstellung. Durch einen komplexen Antrieb können gleichzeitig Filter in den Strahlengang bzw. aus dem Strahlengang herausgedreht werden. Allerdings ist der komplexe Antrieb gleichzeitig auch der größte Nachteil dieser Konstruktion.

4.2.2 Diaprojektor

Für den zweiten Entwurf wurde die Funktionsweise eines Diaprojektors zuhelfe genommen. Ein Diaprojektor projiziert mithilfe einer Lichtquelle das Dia auf eine Leinwand. Bei der Version für die automatische Filterverstellung wird lediglich der Antrieb näher betrachtet. Ein grober Entwurf verdeutlicht die Funktionsweise.

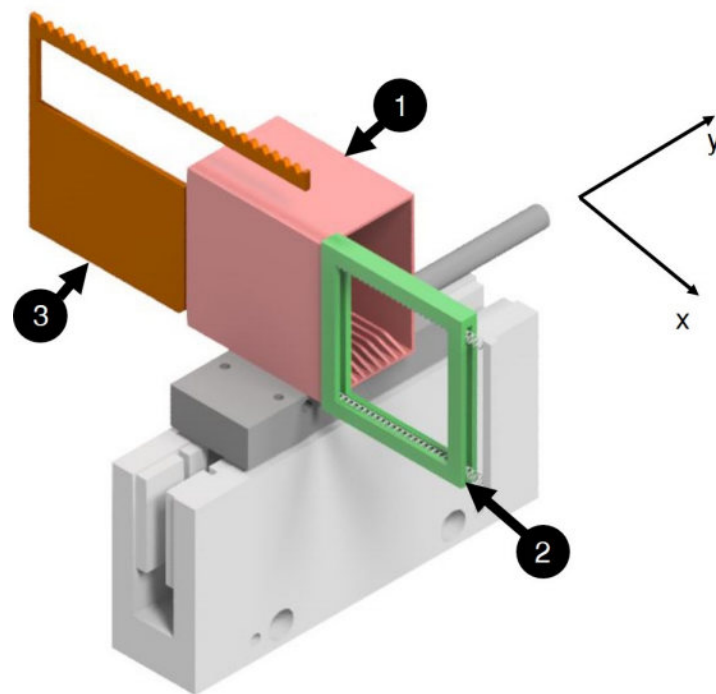


Abbildung 4.3: Diaprojektor-Entwurf

Der Antrieb besteht aus zwei Linearantrieben, die eine Bewegung in x- und y-Richtung ermöglichen. Der Filterbehälter (1) wird so in Position gebracht, dass der Filterschieber (3) den passenden Filter in den Strahlengang (2) schieben kann. Zu den Vorteilen dieser Konstruktion zählt vor allem, dass die Filteranzahl prinzipiell unbegrenzt ist, da sowohl der Antrieb als auch der Filterbehälter erweitert werden können. Durch die Nutzung von linearen Antrieben ist außerdem eine hohe Geschwindigkeit erreichbar. Nachteilig ist der benötigte Bauraum. Bei einer geringen Filteranzahl wäre dieser bereits sehr groß. Die notwendigen Fahrwege bei einem einfachen Filterwechsel sind ebenfalls unvorteilhaft und verursachen eine Steigerung der Filterwechselzeit.

4.2.3 Filtrerrad

Der dritte und letzte Entwurf ist die Konstruktion eines Filtrerrades. Hierbei sind die Filter kreisförmig auf einer Scheibe angeordnet (siehe Abb. 4.4)



Abbildung 4.4: Filterradd [Tho16] [24.05.2016]

Die Vorteile dieser Konstruktion sind ein einfacher Antrieb, eine kompakte Bauweise und ein schneller Filterwechsel. Bei geeigneter Programmierung ist lediglich eine Drehung, die nicht mehr als 180° beträgt, notwendig. Außerdem ist es möglich, mehrerer Filter hintereinander in das Filterradd einzusetzen. Dazu muss lediglich der Bauraum in der Tiefe erhöht werden. Im Gegensatz zum Diaprojektor ist hier jedoch keine unbegrenzte Filteranzahl möglich, da die Dimensionen ansonsten zu groß würden.

4.2.4 Bewertung und Auswahl der Entwürfe

Nach dem Erstellen der drei Entwürfe, wird im folgenden Kapitel die Bewertung unter ausgewählten Gesichtspunkten durchgeführt und anschließend die Wahl für ein Entwurf getroffen. Die wichtigsten Anforderungen bzw. Eigenschaften sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Wie bereits in der Einleitung zur Konstruktion erwähnt, soll das Filterradd kompakt und eine örtliche Verlagerung möglich sein. Die Komplexität des Antriebes sollte in einem angemessenen Rahmen liegen, damit die Kosten für die Konstruktion nicht zu stark ansteigen. Die Anzahl der Filter ist für eine genaue Messung unerlässlich und daher ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Beurteilungskriterien. Der Programmieraufwand fällt entsprechend der Konstruktion eventuell höher aus, da mehr Antriebe auch einen größeren Programmieraufwand bedeuten.

Tabelle 4.1: Bewertung der Entwürfe

	Phoropter	Diaprojektor	Filtrerrad
Komplexität des Antriebs	- -	+	+
Filteranzahl	+	+	+
Kompaktheit	-	-	+
Örtliche Verlagerung	-	-	+
Programmieraufwand	- -	-	+

Bei der Beurteilung zur Komplexität des Antriebes hat der Phoropter die schlechteste Wertung bekommen. Der Antrieb wäre bei einer Umsetzung der Konstruktion sehr komplex und würde für eine kompakte Bauweise nicht geeignet sein. Der Diaprojektor, bestehend aus 2 Linearantrieben und das Filterradd mit einem Elektromotor zum Antrieb des Rades, bieten eine weitaus einfachere und effizientere Lösung.

Die Anzahl der Filter ist bei allen drei Entwürfen abhängig vom Bauraum. Dieser lässt sich den Anforderungen entsprechend anpassen.

Da eine hohe Kompaktheit auch eine örtliche Verlagerung begünstigt, werden diese Punkte zusammengefasst. Aufgrund des komplexen Antriebes beim Phoropter und den zwei Lineareinheiten beim Diaprojektor ist mehr Bauraum notwendig, was die örtliche Verlagerung negativ beeinflusst. Das Filterradd hingegen ist durch die einfache Konstruktion und lediglich einen Antrieb sehr kompakt zu konstruieren und kann in den Punkten Kompaktheit und örtlicher Verlagerung positiv überzeugen.

Der Programmieraufwand ist aufgrund des Antriebs beim Phoropter am höchsten. Der Diaprojektor erfordert auf Grund zweier Antriebe einen ebenfalls höheren Aufwand in der Programmierung als das Filterradd.

Unter Berücksichtigung der wesentlichen Merkmale, die das Filterwechselsystem zu erfüllen hat, geht aus der Bewertung hervor, dass der Entwurf eines Filterrades am besten geeignet ist. Durch die Verwendung eines Rades, in dem die Filterkombinationen eingefasst sind, kann der Bauraum klein gehalten werden und die Möglichkeit einer örtlichen Verlagerung ist gewährleistet. Der einfach gestaltete Antrieb verringert, im Gegensatz zu den anderen Entwürfen, den Programmieraufwand. Im folgenden Kapitel wird ausführlich die Konstruktion des Filterrades erläutert.

4.3 Konstruktion und Dimensionierung der Antriebe

Für die normgerechte Konstruktion und die geeigneten Toleranzen wurden die Bücher von [Hoi05], [We11] und [Fis05] verwendet. In den folgenden Abschnitten wird genauer

auf die Konstruktion der einzelnen Komponenten eingegangen. Hierbei geht es jedoch in erster Linie um die Begründung gewählter Toleranzen, die für eine präzise Positionierung des Filterrades sowie einen reibungslosen Messablauf sorgen.

4.3.1 01.01.16 Filterradd

Das Filterradd ist die Hauptkomponente der gesamten Konstruktion. Aus Erfahrungswerten geht hervor, dass das Filterradd Platz für 10 Filterkombinationen bieten sollte. Zusätzlich ist eine Kammer ohne Filter notwendig, da die Passpunkte und die Pixelmatrix, wie in Kapitel 2 erwähnt, eingestellt werden müssen. Eine weitere Kammer die zunächst ohne Filter bestückt wird ist vorgesehen, falls zu einem späteren Zeitpunkt eine weitere Filterkombination aufgrund einer feineren Grauwertabstufung hinzugefügt werden muss. Zum Antreiben des Filterrades wird eine Zahnradkombination stirn-geradverzahnt verwendet, bei der ein Antriebsritzel das Filterradd antreibt. Bei einem Modul von $0,5\text{ mm}$ und einem Teilkreisdurchmesser von 90 mm ergibt sich eine Zähnezahl von 180.

Es bestand die Überlegung, den Antrieb über einen Zahnriemen auszuführen. Der zusätzliche Bauraum, der durch den Abstand zwischen antreibenden und angetriebenen Rad notwendig wäre, das Langloch, das zur Spannung des Zahnriemens notwendig ist und die Gefahr des Überspringens bei einem Stop des Antriebes haben jedoch gegen diese Antriebsart gesprochen.

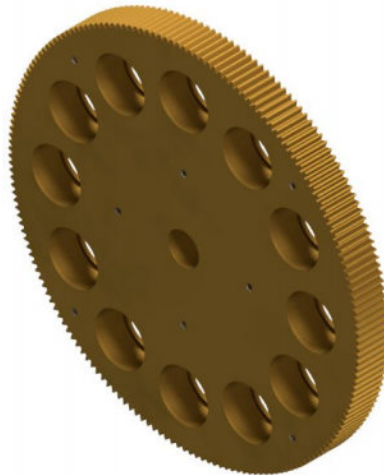


Abbildung 4.5: Filterradd

Die Erfahrungen der letzten Jahre im Bereich der Strahlungsflussdichtemessung von hochkonzentrierter Strahlung haben gezeigt, dass Filter mit Neutralschichten zwischen vier und

neun eingesetzt werden müssen. Die maximale Neutraldichte eines Filters beträgt vier. Um Neutraldichten über vier zu erhalten, müssen demnach mehrere Filter kombiniert werden. Die Möglichkeit ein zweites Filterradd einzusetzen ist aufgrund der gewünschten Kompaktheit nicht sinnvoll. Das Filterradd muss eine Dicke aufweisen, die es ermöglicht, drei Filter hintereinander aufzunehmen. Übliche Neutraldichtefilter besitzen eine Dicke von 1 mm . Dies ergibt bei der Verwendung von drei Filtern eine Gesamtdicke von 3 mm . Da durch Doppelreflexion die Möglichkeit bestehen muss, die Filter gegeneinander zu verkippen, wurde die Dicke des Filterraddes auf 8 mm erhöht, sodass jeder Filter gegenüber dem benachbarten um ca. $4,6^\circ$ verkippt werden kann. Die Filter besitzen einen Durchmesser von $12,5\text{ mm}$, weshalb die dafür vorgesehene Bohrung den Durchmesser $12,7\text{ mm}$ ($+0,1\text{ mm}$) besitzt und die Filter in jedem Fall in die Öffnungen passen. Ein $0,8\text{ mm}$ breiter Bund und das Halterad (s.u.) verhindern ein Durchfallen der Filter. Zur Befestigung des Filterraddes auf der Welle wird eine Pressverbindung benutzt. Die gewählten Toleranzen für den Sitz auf der Welle sind H7 für die Bohrung und p6 für die Welle. Dies führt zu einer Übermaßpassung (vgl. [Fis05]). Als Material wird Messing Mg58 verwendet, da es gute Schmiereigenschaften besitzt und für eine Zahnradverbindung geeignet ist.

4.3.2 01.02.16 Halterad

Das Halterad dient, wie bereits oben erwähnt, zur Fixierung der Neutraldichtefilter im Filterradd. Mit einem Durchmesser von 87 mm und einer Dicke von 1 mm wird das Halterad mittels 8 Schrauben am Filterradd befestigt.



Abbildung 4.6: Halterad

4.3.3 01.03.16 Welle

Die Welle ist in der Mitte des Filterrada platziert und gleitet in zwei Gleitlagerbuchsen in der Vorder- und Rückwand. Der Wellendurchmesser ist 8 mm und ist mit einer Toleranz von p6 versehen. Dies führt, wie bereits in Kapitel 4.3.1 erwähnt, zu einer Übermaßpassung.



Abbildung 4.7: Welle

Die Welle besitzt eine Länge von $29,5\text{ mm}$ und ragt damit aus der Rückseite des Gehäuses heraus. An dem überstehenden Ende der Welle wird der Encoder befestigt, der durch eine Hohlwellenausführung auf die Welle gesteckt und mit einer Madenschraube befestigt wird. Der Encoder wird dazu benutzt, die Winkeländerung und damit die Absolutposition des Filterrada zu messen. Durch das Anbringen des Encoders an der Welle mit direkter Verbindung zum Filterrada, kann die Winkelposition genauer bestimmt werden und ist nicht durch ein Spiel in der Zahnradverbindung zwischen Motor und Antriebsritzel gestört.

4.3.4 01.04.16 Vorderwand

Auf der Vorderwand des Filterradagehäuses wird das Objektiv befestigt. Hierzu wird auf Höhe der Apertur der Kamera eine 42 mm große Bohrung konstruiert, um ausreichend Platz zur Befestigung zu bieten.

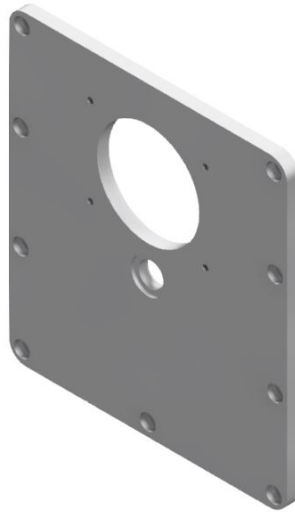


Abbildung 4.8: Vorderwand

Auf der Vorderwand werden vier Gewindebohrungen vorgenommen, die den Bajonettanschluss für ein EF-Mount Adapter befestigen. Des Weiteren wird eine Bohrung für die Gleitlagerbuchse vorgenommen. Sieben Bohrungen an der Außenkante der Vorderwand verbinden den Rahmen und die Rückwand miteinander.

4.3.5 01.05.16 Rückwand

Die Rückwand des Filterraddgehäuses muss Befestigungsmöglichkeiten für die Kamera, den Encoder und den Motor besitzen.

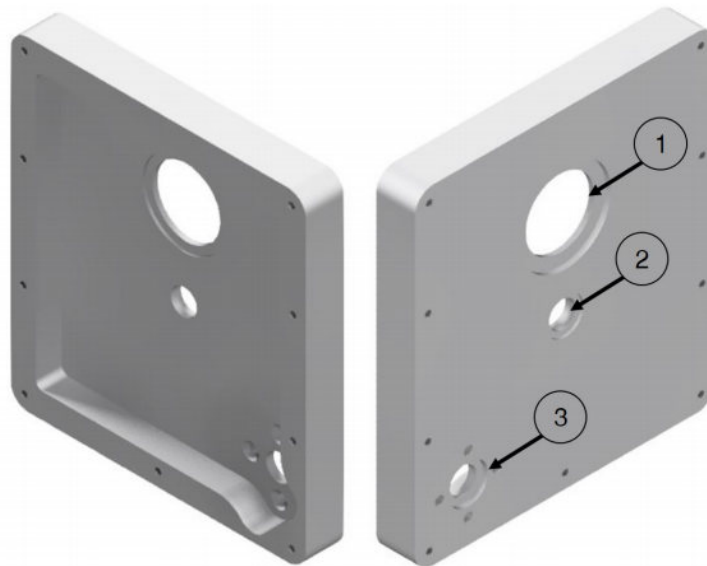


Abbildung 4.9: Vorder- und Rückansicht der Rückwand

Für die Befestigung der Kamera wird ein Kameraanschluss konstruiert, der im nachfolgenden Abschnitt erläutert wird. Die dafür vorgesehene Bohrung befindet sich an Position 1. An Position 2 ist die Bohrung für die Gleitlagerbuchse und an Position 3 die Bohrung zur Befestigung des Motors. Die Rückwand besitzt einen 10 *mm* tiefen und 10 *mm* breiten Rahmen mit neun M3 Gewindebohrungen, um die Vorder- und Rückwand miteinander zu verbinden. Der Rahmen ist an der Befestigungsstelle für den Motor schmaler gestaltet, um eine einfache Befestigung des Motors zu gewährleisten.

4.3.6 01.06.16 Kameraanschluss

Der Kameraanschluss wird mittels eines Sicherungsringes an der Rückwand befestigt. Der Anschluss besitzt ein 25,4 x 0,75 Außengewinde, auf das die Kamera geschraubt wird.



Abbildung 4.10: Kameraanschluss

Die Gesamtdicke beträgt 8 mm und der Durchmesser im Filterradgehäuse 32 mm . Der Durchmesser der Kernbohrung ist 22 mm .

4.3.7 Filter

Der Sonnenofen am Standort Köln existiert seit 1994. Aufgrund der gesammelten Erfahrung bei der Strahlungsflussdichtemessung, haben sich geeignete Filterkombinationen durchgesetzt. Diese Kombinationen werden bei der Konstruktion des Filterrades ebenfalls eingesetzt. Im folgenden sind die Kombinationen mit der Neutraldichte und der Transmission in % aufgeführt

Tabelle 4.2: Filterkombinationen

Filterkombination	Dichte	Transmission %
1	4,7	$2,0 \cdot 10^{-5}$
2	4,8	$1,6 \cdot 10^{-5}$
3	5,7	$2,0 \cdot 10^{-6}$
4	5,8	$1,6 \cdot 10^{-6}$
5	6,5	$3,2 \cdot 10^{-7}$
6	6,6	$2,5 \cdot 10^{-7}$
7	7,6	$2,5 \cdot 10^{-8}$
8	8	$1,0 \cdot 10^{-8}$
9	8,5	$3,2 \cdot 10^{-9}$
10	8,6	$2,5 \cdot 10^{-9}$

4.3.8 Antriebe

Für die Auslegung des Antriebes ist es notwendig, das Drehmoment zur Bewegung des Filtrerrades zu berechnen und anschließend einen geeigneten Motor auszuwählen. Das Drehmoment lässt sich aus den Trägheitsmomenten der bewegten Komponenten und der Winkelbeschleunigung ermitteln. Die im weiteren Verlauf verwendeten Parameter sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Parameter zur Bestimmung des Drehmoments

Dichte Stahl	ρ_{St}	7850 $\frac{kg}{m^3}$
Dichte Filterglas	ρ_{Fi}	2560 $\frac{kg}{m^3}$
Dichte Messing	ρ_{Me}	8470 $\frac{kg}{m^3}$
Teilkreisdurchmesser Filtrerrad	d_{Fi}	90 mm
Teilkreisdurchmesser Antriebsritzel	d_{Ri}	15 mm
Durchmesser Filterbohrungen	d_{Bo}	11 mm
Durchmesser Bohrung für Welle	d_{Wbo}	8 mm
Breite des Filtrerrades	h_{Fi}	8 mm
Breite des Antriebsritzels	h_{Ri}	5 mm
Abstand Drehachse zu Bohrungen	s_{Bo}	33 mm
Übersetzung des Getriebes	i	6
Gesamtträgheitsmoment Filtrerrad	J_{Fi}	-
Trägheitsmoment Antriebsritzel	J_{Ri}	-
Trägheitsmoment Filtrerrad	J_{Za}	-
Trägheitsmoment Filterkammern	J_{Fikam}	-

Wie bereits oben erwähnt, wird das Drehmoment mithilfe von Trägheitsmoment und Winkelbeschleunigung berechnet. Da der Motor sowohl das Antriebsritzel als auch das Filtrerrad bewegen muss, besteht das Trägheitsmoment des Gesamtsystems aus zwei Komponenten. Das Drehmoment, welches der Motor leisten muss, lässt sich also folgendermaßen bestimmen

$$M_{in} = J_{System} \cdot \alpha . \quad (4.1)$$

Die Winkelbeschleunigung ist von der Winkelgeschwindigkeit und der Beschleunigungszeit abhängig. Die Beschleunigungszeit ist die Zeit, bis das Filtrerrad die gewünschte Geschwindigkeit erreicht hat. Da ein schneller Filterwechsel gefordert ist, wird die Winkelgeschwindigkeit des Filtrerrades auf 15 $\frac{1}{min}$ festgelegt. Das bedeutet, bei 12 Positionen und

einer Rotation von maximal 180° nach links bzw. rechts, eine maximale Positionswechseldauer von 2 s . Die Beschleunigungszeit wird auf $0,1\text{ s}$ festgelegt, was für die geforderte Anwendung ausreichend ist. Mit der Übersetzung i des Getriebes lässt sich analog die Winkelgeschwindigkeit des Antriebsritzels berechnen

$$n_{Ritzel} = n_{Filtrerrad} \cdot i = 90 \frac{1}{\text{min}} , \quad (4.2)$$

welche in Formel (4.3) benötigt wird. Die geforderte Winkelbeschleunigung des Filtrerrades beträgt

$$\alpha = \frac{\omega}{t_a} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}}{t_a} = 94,25 \frac{1}{\text{s}^2} . \quad (4.3)$$

Nachdem die Winkelbeschleunigung bestimmt wurde, muss nun das Trägheitsmoment des Systems berechnet werden. Hierzu werden die einzelnen Trägheitsmomente der bewegten Komponenten (Filtrerrad, Antriebsritzel und Motor) separat ermittelt und anschließend addiert

$$J_{System} = J_{Fi} + J_{Ri} + J_{Motor} . \quad (4.4)$$

Zunächst wird das Trägheitsmoment des Filtrerrades bestimmt. Dabei wird das Filtrerrad aufgrund der Bohrung in der Mitte als Hohlzylinder angenommen und anschließend werden die Trägheitsmomente der Filterkammern subtrahiert

$$J_{Fi} = J_{Za} - J_{Fikam} . \quad (4.5)$$

Das Trägheitsmoment des Filtrerrades als Hohlzylinder lässt sich folgendermaßen berechnen

$$J_{Za} = \frac{1}{2} \cdot m_{Zah} \cdot \left[\left(\frac{d_{Fi}}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_{Wbo}}{2} \right)^2 \right] . \quad (4.6)$$

Die Masse des Filtrerrades wird anhand der Dichte und des Volumens berechnet

$$m_{Za} = \rho_{St} \cdot \pi \cdot h_{Fi} \cdot \left[\left(\frac{d_{Fi}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{Wbo}}{2} \right)^2 \right] . \quad (4.7)$$

Durch Einsetzen der Formel (4.7) in Formel (4.6) ergibt sich ein Trägheitsmoment von

$$J_{Za} = 4,04 \cdot 10^{-4} \text{kgm}^2 .$$

Die Berechnung der Filterkammerträgheitsmomente lässt sich analog durchführen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Steiner'sche Anteil hinzugerechnet werden muss, da die Filterkammern um eine freie Achse rotieren

$$J_{Fikam} = 12 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot m_{Bo} \cdot \left(\frac{d_{Bo}}{2} \right)^2 + m_{Bo} \cdot s_{Bo}^2 - \frac{1}{2} \cdot m_{Fi} \cdot \left(\frac{d_{Bo}}{2} \right)^2 + m_{Fi} \cdot s_{Bo}^2 \right) . \quad (4.8)$$

Die Massen werden wiederum mithilfe der Dichten und des Volumens berechnet

$$m_{Bo,Fi} = \rho_{St,Fi} \cdot \pi \cdot h_{Fi} \cdot \left(\frac{d_{Bo}}{2}\right)^2. \quad (4.9)$$

Durch Einsetzen der Formel (4.9) in Formel (4.8) lässt sich das Trägheitsmoment für die Filterkammern berechnen

$$J_{Fikam} = 5,33 \cdot 10^{-5} \text{kgm}^2.$$

Es ergibt sich also ein Gesamtträgheitsmoment für das Filterrads von

$$\begin{aligned} J_{Fi} &= 4,04 \cdot 10^{-4} \text{kgm}^2 - 5,33 \cdot 10^{-5} \text{kgm}^2 \\ &= 3,507 \cdot 10^{-4} \text{kgm}^2. \end{aligned}$$

Das Trägheitsmoment des Antriebsritzels lässt sich analog zu Formel (4.6) berechnen und ergibt nach Einsetzen

$$J_{Ri} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{kgm}^2.$$

Durch die Addition der Trägheitsmomente J_{Fi} , J_{Ri} und J_{Motor} , in diesem Fall beträgt das Motorträgheitsmoment $2,12 \cdot 10^{-7} \text{kgm}^2$, ergibt sich das Gesamtträgheitsmoment von

$$\begin{aligned} J_{System} &= 3,507 \cdot 10^{-4} \text{kgm}^2 + 2,1 \cdot 10^{-7} \text{kgm}^2 + 2,12 \cdot 10^{-7} \text{kgm}^2 \\ &= 3,511 \cdot 10^{-4} \text{kgm}^2. \end{aligned}$$

Mithilfe des Gesamtträgheitsmomentes und Formel 4.1 lässt sich nun das geforderte Drehmoment berechnen zu

$$\begin{aligned} M_{in} &= 3,511 \cdot 10^{-4} \text{kgm}^2 \cdot 94,25 \frac{1}{s^2} \\ &= 0,03 \text{Nm}. \end{aligned}$$

Zugunsten einer kompakten Bauweise, wurde ein BLDC-Motor (Brushless Direct Current) der Firma Nanotec ausgewählt. Zu den Vorteilen von BLDC-Motoren zählen eine geringe Baugröße, eine schnelle Beschleunigung, sowie Verzögerung und ein schneller Richtungswechsel. Das Modell DB28M01 besitzt eine Gehäuselänge von 38 mm und ist in der Lage, $10.000 \frac{U}{min}$ zu leisten. Der Motor besitzt ein Spitzendrehmoment von 0,042 Nm und das Nennmoment ist 0,014 Nm. Damit liegt es zwar unter dem geforderten Drehmoment, da aber das Spitzenmoment über dem geforderten Wert liegt und das Filterrads nicht dauerhaft rotiert, reicht der Motor für die Anwendung aus.

Während erster Testdurchläufe und nach Rücksprache mit einem Mitarbeiter der Firma Nanotec ist festgestellt worden, dass der Motor nicht unterhalb einer Drehzahl von $1500 \frac{U}{min}$ ordnungsgemäß funktioniert. Daher musste nachträglich ein Getriebe mit einer Übersetzung von 1:100 eingebaut werden, was durch Lieferengpässe eine Verzögerung der Testphase verursachte.

Für die Positionsbestimmung wird der Single-Turn Encoder AH25S der Firma SIKO GmbH verwendet. Der Encoder misst den Winkel absolut und als Messsignal wird ein Strom zwischen $4 mA$ und $20 mA$ ausgegeben. Der Vorteil dieses Messbereichs ist, dass im Falle einer Fehlfunktion des Encoders, beispielsweise durch Beschädigung der Elektronik, ein Strom von $0 mA$ ausgegeben wird (drahtbruchsicher). Wäre der Messbereich von $0 mA$ bis $20 mA$, ist ein Fehler umständlicher festzustellen. Der Encoder besitzt eine Hohlwelle, die auf der Welle des Filtrerrades befestigt wird. Dadurch lassen sich Fehlmessungen durch Toleranzen im Getriebe zwischen Motor und Planetengetriebe, sowie Planetengetriebe und Filtrerrad vermeiden.

4.4 Zusammenbau

Der Zusammenbau des Filtrerrades beginnt mit der Verschraubung des Motors mit der Gehäuserückwand. Die Gehäuserückwand ist so vorbereitet, dass der Kameraadapter in die Rückwand geklemmt und das Gleitlager für die Welle des Filtrerrades befestigt wurde. Der Motor und das Getriebe wurden vormontiert geliefert. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass das eingesetzte Getriebe ein Ersatzgetriebe darstellt. Die Lieferzeit eines geeigneten Getriebes hätte die Dauer der Masterarbeit überschritten.

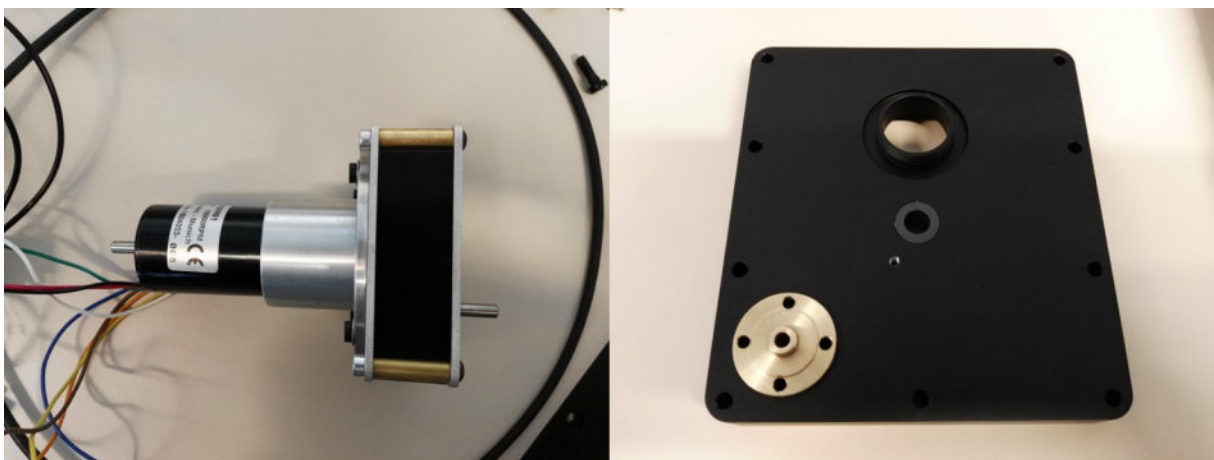


Abbildung 4.11: Motor mit Getriebe (links) und Außenseite der Rückwand

Der Motor wird mit vier Schrauben von der Innenseite der Gehäuserückwand mit dieser verschraubt. Anschließend wird das Antriebsritzel auf die Getriebewelle gesteckt und mit einer Madenschraube auf dieser befestigt. Zur eindeutigen Identifizierung der Filterkammern werden diese mit den Zahlen von 1 bis 12 gekennzeichnet. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, werden die Filter von der Lichtquelle aus mit steigender Neutraldichte in die dafür vorgesehenen Öffnungen eingeführt. Anschließend wird das Halterad mit dem Filtrerrad verschraubt, so dass die Filter nicht aus den Kammern fallen können. Das Filtrerrad wird auf die Welle geschoben und anschließend in die Rückwand durch das Gleitlager eingesteckt. Zwischen dem Filtrerrad und der Vorder- bzw. Rückseite wird jeweils eine Teflonscheibe platziert, die das Verkippen bzw. Schleifen des Filtrerrades am Gehäuse verhindert. Teflon besitzt zudem gute Schmiereigenschaften und belastet durch eine geringe Reibung den Motor nicht zusätzlich.

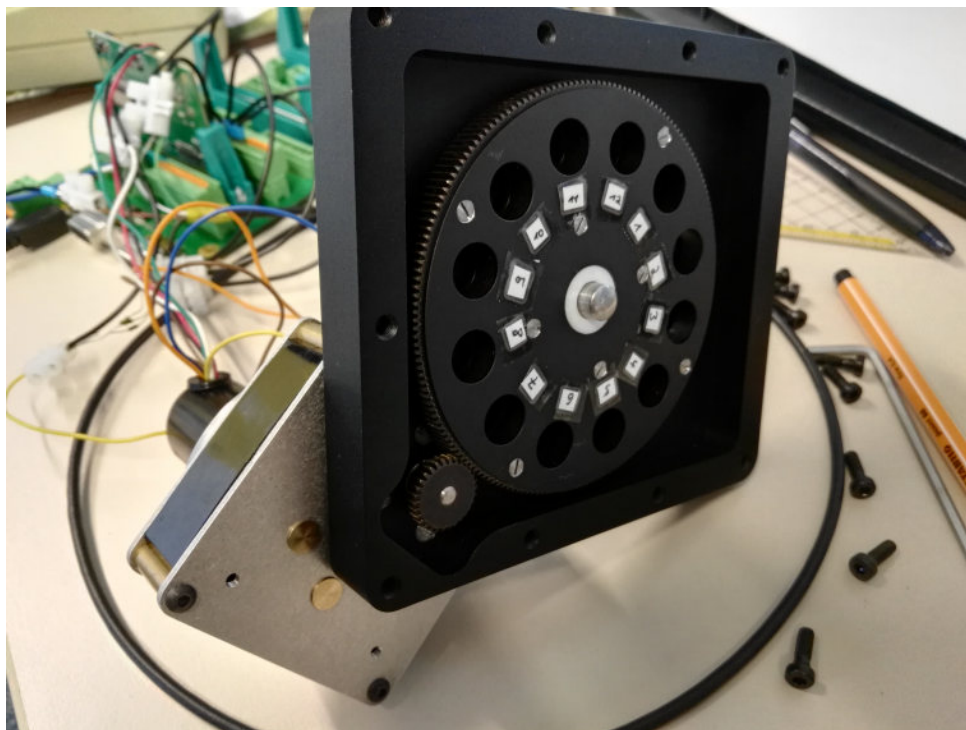


Abbildung 4.12: Filtrerrad mit Rückwand

In der Vorderwand muss ebenfalls das Gleitlager festgeklemmt werden. Der Objektivadapter wird mit vier Schrauben an der Vorderwand befestigt. Um die Verbindung zwischen Objektiv und Gehäuseinnenraum lichtdicht zu gestalten, wurde ein Ring gefertigt, der zwischen Objektivadapter und Vorderwand platziert wird. Die Vorderwand wird mit neun Schrauben an der Rückwand verschraubt.

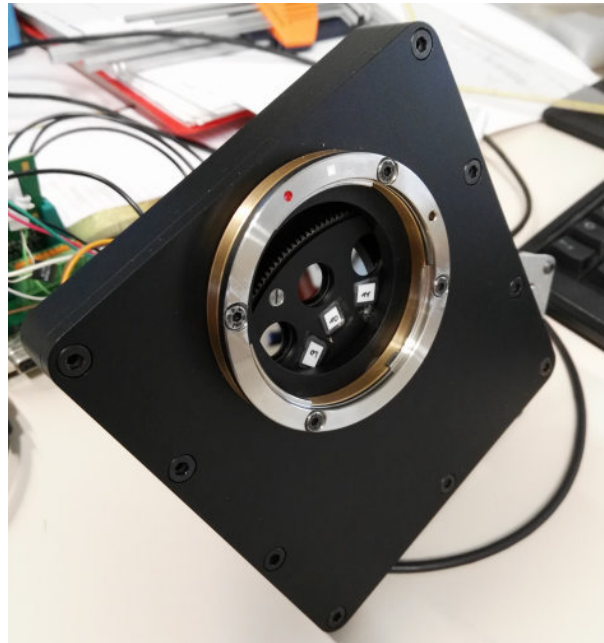


Abbildung 4.13: Vorderseite des Filterrades

Abschließend wird an der Rückseite die Kamera und der Encoder befestigt und der Zusammenbau des Filterrades ist abgeschlossen.

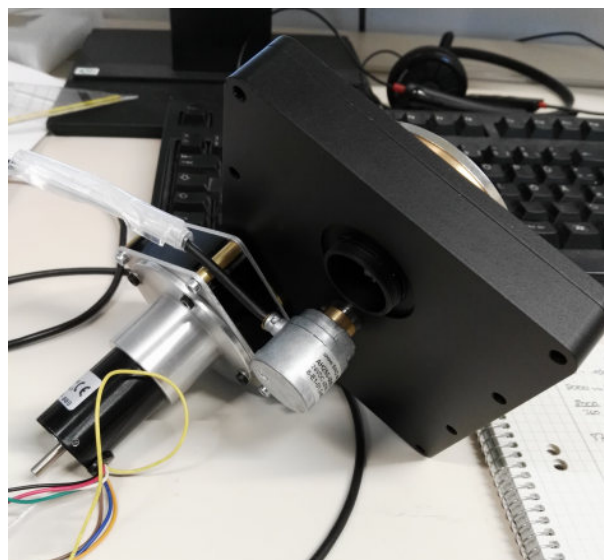


Abbildung 4.14: Rückseite des Filterrades

5 Programmierung

In diesem Kapitel wird die Programmierung des Filtrerrades behandelt. Zunächst werden die Grundlagen zur eingesetzten Software vermittelt. Anschließend wird die Programmstruktur aufgezeigt und abschließend der Programmablauf detailliert beschrieben. Die Programmierung des BLDC-Motors wurde mithilfe des Programmierhandbuchs von Nanotec Electronic GmbH & Co. KG (vgl. [Nan13]) angefertigt.

5.1 Software LabVIEW

Für die Programmierung des Filtrerrades wird die Software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) von National Instruments eingesetzt. LabVIEW ist eine grafische Programmierungsumgebung und wird in der Mess-, Regel- und Automatisierungstechnik eingesetzt. Zu den Einsatzmöglichkeiten des Programmes zählen das Erfassen von Messsignalen, Ausgeben von Steuersignalen und Regeln von Zustandsgrößen in automatisierten Prozessen (vgl. [Nat16]).

Der Ablauf des Programms verläuft von links nach rechts und ist unter dem Namen Datenflussmodell bekannt. Die entwickelten Programme oder Funktionsblöcke werden Virtuelle Instrumente (VIs) genannt und können über Ein- und Ausgänge verfügen. So lassen sich auch mehrere VIs miteinander verbinden und zu einem vollständigen Programm verknüpfen. Dies erleichtert die Lesbarkeit des Programmcodes für den Benutzer, da Unterprogramme in Sub-VIs programmiert werden können. Der in der grafischen Oberfläche entwickelte Programmcode wird durch einen Compiler in die Hochsprache C oder C++ kompiliert und anschließend in den für die CPU lesbaren Maschinencode übersetzt.

Der generelle Aufbau von LabVIEW besteht aus zwei Oberflächen. Das Frontpanel ist die Benutzeroberfläche, die bei Programmablauf für den Benutzer sichtbar ist. Hier befinden sich Anzeige- und Bedienelemente. Auf der zweiten Oberfläche wird der Programmablauf entwickelt. Der Quellcode wird mithilfe von grafischen Funktionsblöcken aufgebaut und die einzelnen Funktionsblöcke werden miteinander verbunden.

5.2 Softwarearchitektur

Die Software der Filtrerradsteuerung wird durch ein Projekt in LabVIEW realisiert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist die übersichtliche Auflistung von Sub-VIs und Typdefinitionen, die weiter unten erläutert sind. Das Hauptprogramm trägt den Namen Steuerung.vi. Dort sind alle Sub-VIs und Typdefinitionen implementiert. Für die einzelnen Schritte der Filtrerradsteuerung wurden die Sub-VIs Grauwertvergleich, Manuell,

Volt_Array, OpenVisa, Open_DAQ, Position_messen und Read_Write erstellt. Die Typdefinitionen Filtrerrichtung, Positionen, Volt und Zustände finden ebenfalls Verwendung sowohl im Hauptprogramm, als auch in den Sub-VIs.

Das Grundgerüst des Quellcodes besteht aus Eingängen, dem Hauptprogramm, welches die Eingänge verarbeitet und den Ausgängen (siehe Abb. 5.1). Eine detailliertere Darstellung folgt in Kapitel 5.3.

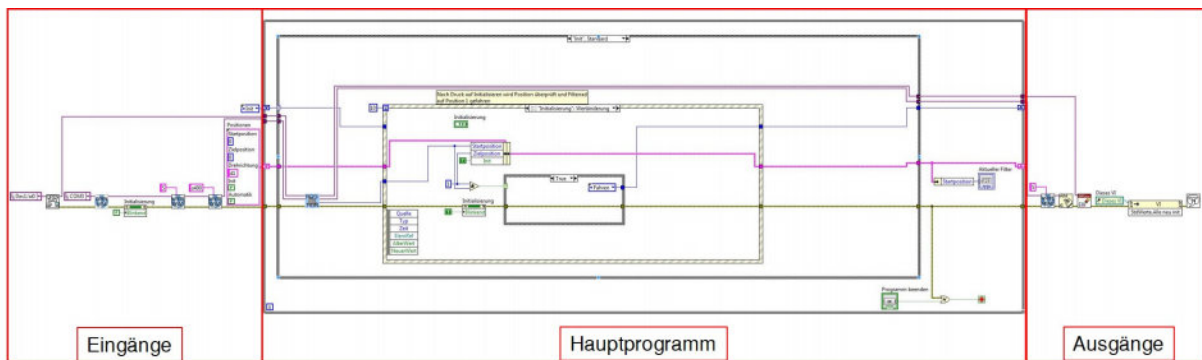


Abbildung 5.1: Grundstruktur des Programms

Das Frontpanel (siehe Abb. 5.2) bietet dem Benutzer die Möglichkeit, das Programm zu steuern. Es befinden sich Buttons zur Initialisierung des Filtrerrades, zum Starten und Beenden des Automatikprogramms, zur manuellen Verstellung der Filter und ein Eingabefeld, um eine gewünschte Filterposition direkt anzusteuern, sowie ein Button zum Beenden des gesamten Programms. Des Weiteren wurde ein Anzeigefeld, welches die aktuelle Filterposition anzeigt, hinzugefügt und zwei Warn-LED's. Die Warn-LED's sollen den Benutzer darauf hinweisen, dass ein Weiterdrehen des Filtrerrades von Position 12 auf 1 oder ein Zurückdrehen von Position 1 auf 12 nicht möglich ist. Damit soll dem Benutzer deutlich gemacht werden, dass ein Weiter- bzw. Zurückdrehen des Filtrerrades immer eine entsprechende Reduzierung bzw. Steigerung der Neutraldichte bewirkt.

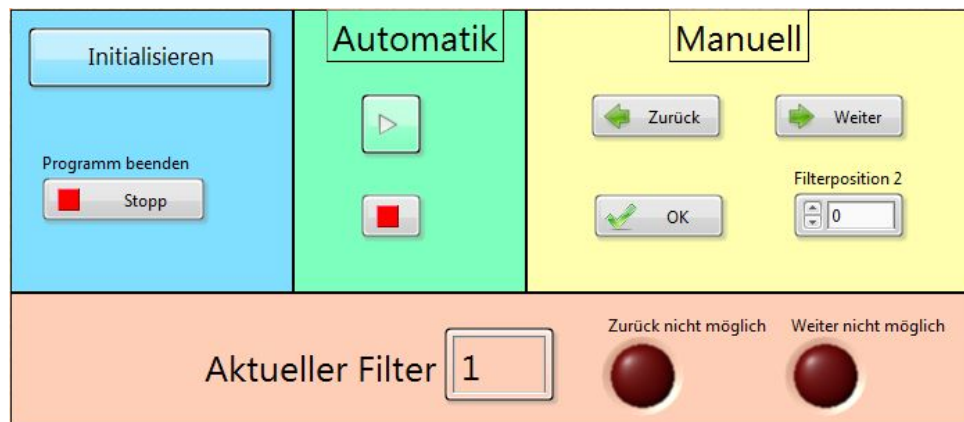


Abbildung 5.2: Frontpanel

5.3 Programmablauf

Die automatische oder manuelle Verstellung des Filtrerrades wird in den gesamten Prozess zur Strahlungsflussdichtemessung integriert. In der folgenden Erläuterung zum Programmablauf wird detailliert auf den Ablauf der Filtrerradsteuerung eingegangen und der gesamte Messprozess nicht näher betrachtet.

Die Eingänge, die das Hauptprogramm benötigt, sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Eingänge für das Hauptprogramm

Name	Typ	Werte
Startposition	Integer	1 - 12
Zielposition	Integer	1 - 12
Drehrichtung	String	d1, d0
Init	Boolesch	True, False
Automatik	Boolesch	True, False
Zustand	Enum	Init, Grauwertvergleich, Fahren, Warten
Kommunikation	Gerätereferenzen	COM1 Dev1/ai0
Grauwert	Integer	0 - 255

Die ersten fünf Parameter sind in einem Cluster zusammengefügt. Cluster können verschiedene Datentypen wie Boolesche Variablen, String- und Integer-Werte enthalten. Die Enum-Konstante „Zustand“ beinhaltet verschiedene Zustände (siehe Tab. 5.1), die während des

schreibt Befehle in die Motorsteuerung. In diesem Fall wird der Befehl „S“ für „Motor stoppen“ der Steuerung mitgeteilt, damit der Motor bei Programmstart in keinem Fall rotiert. Der Befehl „o400“ gibt die Drehzahl in Hz an und wird der Steuerung mitgeteilt. Der Umrechnungsfaktor von Hz in $\frac{U}{min}$ ist 5. Bei dieser Einstellung dreht der Motor also mit $2000 \frac{U}{min}$.

Der Ablauf des Programms zur Filtereinstellung ist in Abb. 5.4 dargestellt. Sobald das Programm gestartet wird, startet das Unterprogramm zur Positionsbestimmung des Filterrades. Wenn der Benutzer den Button „Initialisierung“ auf dem Frontpanel mit der Maus drückt, wird die Initialisierung durchgeführt. Ist die ausgelesene Position „1“, wird in den Zustand des manuellen Fahrens gewechselt. Falls die Position von 1 abweicht, wird der Zustand „Fahren“ aufgerufen, bei dem die Position „1“ angefahren wird. Wenn der Benutzer in den Automatikmodus wechseln möchte, so muss der Button „Play“ im Feld „Automatik“ gedrückt werden. Sobald der Modus aktiviert wird, startet der Grauwertvergleich. Ist der gemessene maximale Grauwert außerhalb des definierten Bereiches zwischen 110 und 240, wird das Filterrada verstellt. Sollte der maximale Grauwert kleiner 110 sein, so wird ein schwächerer Filter eingestellt. Ist der Grauwert größer als 240, wird ein stärkerer Filter eingestellt. Hierbei gibt es jedoch noch eine weitere Fallunterscheidung, die bei der detaillierten Beschreibung des Sub-VI's „Grauwertvergleich“ aufgezeigt wird. Wenn der Wert innerhalb des Bereiches liegt, wird ein neuer Grauwert ausgelesen und der Vergleich erneut durchgeführt. Der Anwender kann die automatische Filtereinstellung mit dem „Stop“ Button jederzeit beenden.

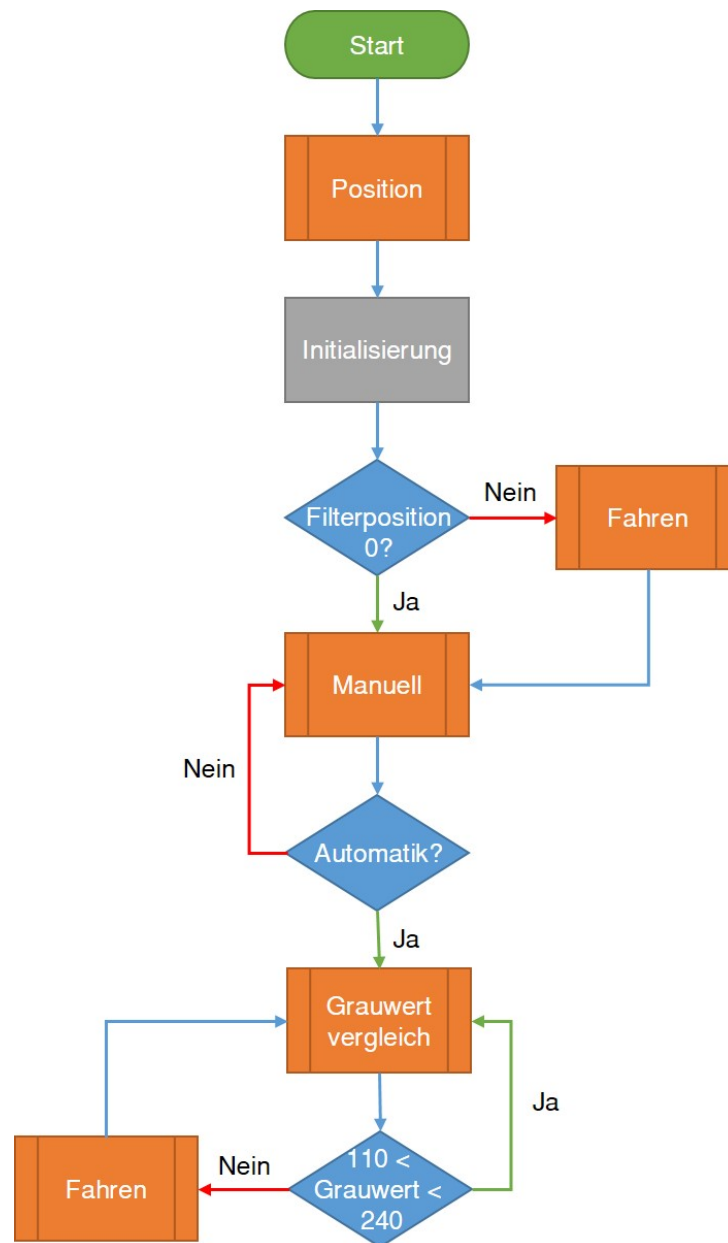


Abbildung 5.4: Programmablaufplan

Im weiteren Verlauf werden die wichtigsten Sub-VI's näher erläutert und die entwickelten Algorithmen anhand von Beispielen beschrieben. Der Programmablauf zur Positionsbestimmung ist in Abb. 5.5 dargestellt.

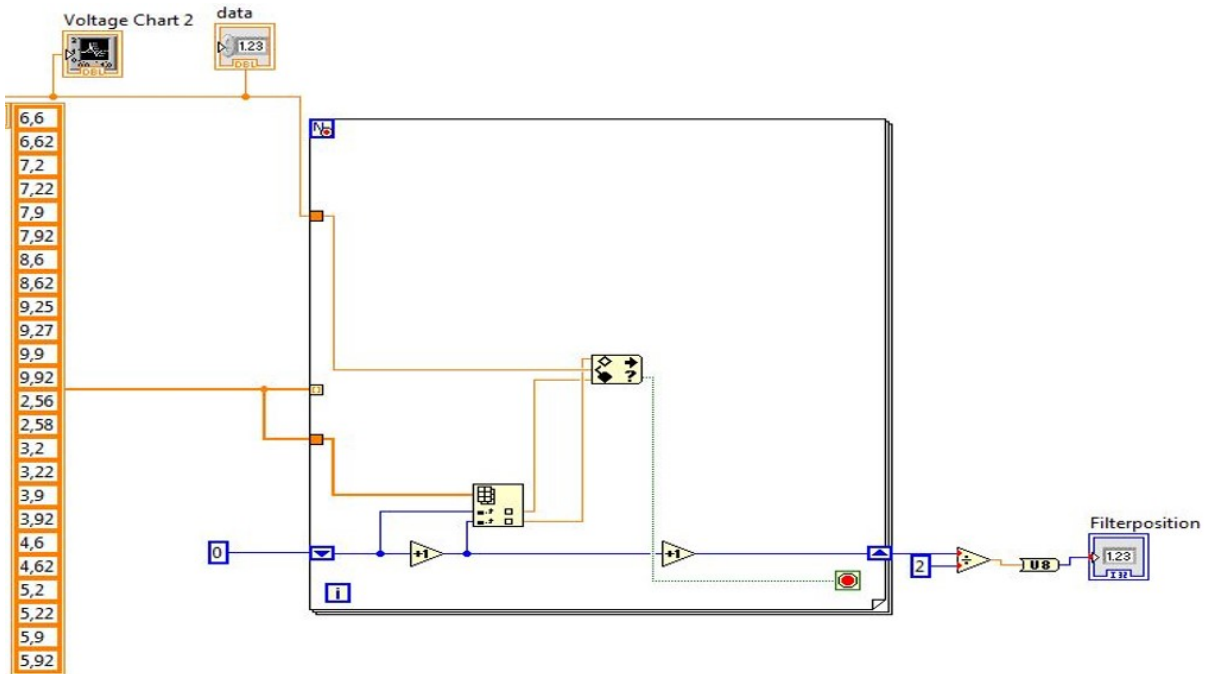


Abbildung 5.5: Positionsbestimmung

Für die einzelnen Filterpositionen wird mithilfe des Encoders eine Ober- und Untergrenze definiert. Das abgebildete Array in Abb. 5.5 mit den Ober- bzw. Untergrenzen ist nur ein Beispielarray für das unten erläuterte Beispiel. Die Grenzen werden in dem separaten Sub-VI „Volt_Array“ berechnet und dem VI in Abb. 5.5 zugeführt. Die Messwerte in Volt werden in einer For-Schleife mit den Ober- und Untergrenzen verarbeitet. Eine Variable wird ebenfalls in die For-Schleife integriert und gibt den Index der einzelnen Voltwerte an. Ein Beispiel verdeutlicht die Vorgehensweise der Positionsbestimmung. Angenommen der Messwert des Encoders beträgt 7,21. Beim ersten Schleifendurchlauf wird der Wert mit dem Index „0“, also 6,6 als Untergrenze und der Wert mit dem Index „1“, also 6,62 als Obergrenze definiert. Anschließend wird überprüft, ob sich der gemessene Wert innerhalb dieser Grenzen befindet. Da dies nicht der Fall ist, wird der Wert „False“ ausgegeben und die For-Schleife weiter ausgeführt. Die Variable für den Index beträgt nach dem ersten Durchlauf „2“, da sie zweimal inkrementiert wurde. Die Variable wird per Schieberegister in den nächsten Durchlauf eingefügt. Der Wert an der dritten Stelle im Array ist 7,2 und stellt die Untergrenze für die zweite Filterposition dar und die Obergrenze mit dem Index „3“ beträgt 7,22. Nach der Überprüfung, ob sich 7,21 innerhalb dieser Grenzen befindet, wird der Wert „True“ ausgegeben und die For-Schleife wird beendet. Die Variable für den Index beträgt nach der Beendigung der Schleife „4“. Dieser Wert wird anschließend durch 2 geteilt und ergibt die momentane Filterposition, in diesem Falle 2.

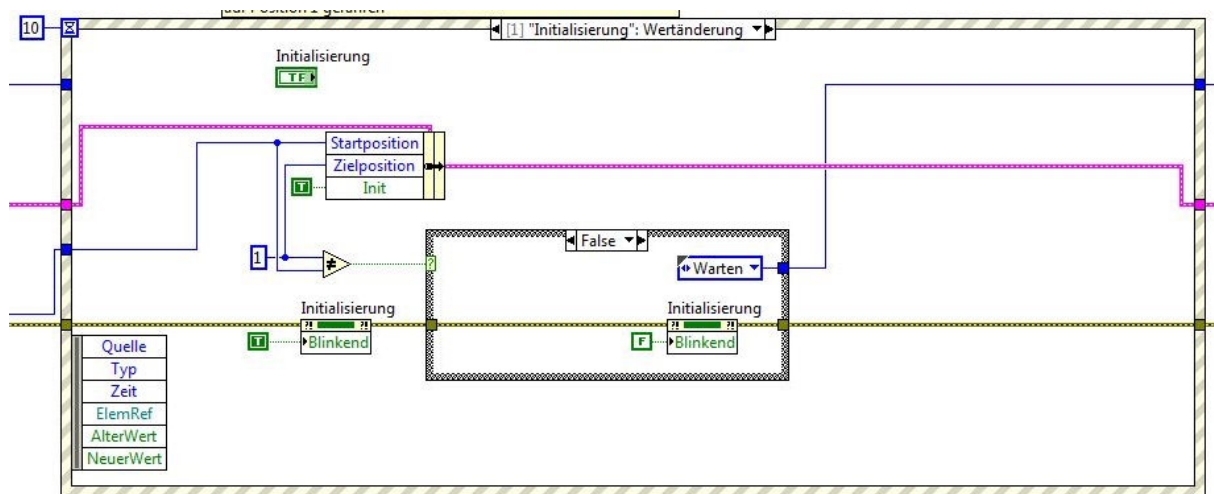


Abbildung 5.6: Struktur Initialisierung

Abb. 5.6 zeigt die Programmstruktur des Zustands „Initialisieren“. Sobald der Button zur Initialisierung betätigt wird, startet der abgebildete Programmablauf. Zunächst wird die gemessene Position als Startposition definiert. Die Zielposition bei der Initialisierung ist „1“ und die boolesche Variable für „Init“ wird auf „True“ gesetzt. Während des gesamten Initialisierungsablaufs blinkt der Button, der zuvor aktiviert wurde, was durch einen Eigenschaftsknoten realisiert wird. Wie bereits oben erwähnt, wird die gemessene Startposition mit der Zielposition auf Ungleichheit geprüft. Sind die Positionen gleich, also das Ergebnis der Überprüfung ist „False“, wird die Eigenschaft des blinkenden Buttons auf „False“ gesetzt und der Zustand „Warten“ aufgerufen. Sollten die Positionen nicht übereinstimmen, wird der Zustand „Fahren“ aufgerufen. Der Zustand „Fahren“ kann in drei Abschnitte aufgeteilt werden. Der erste Schritt des Zustandes ist in Abb. 5.7 dargestellt.

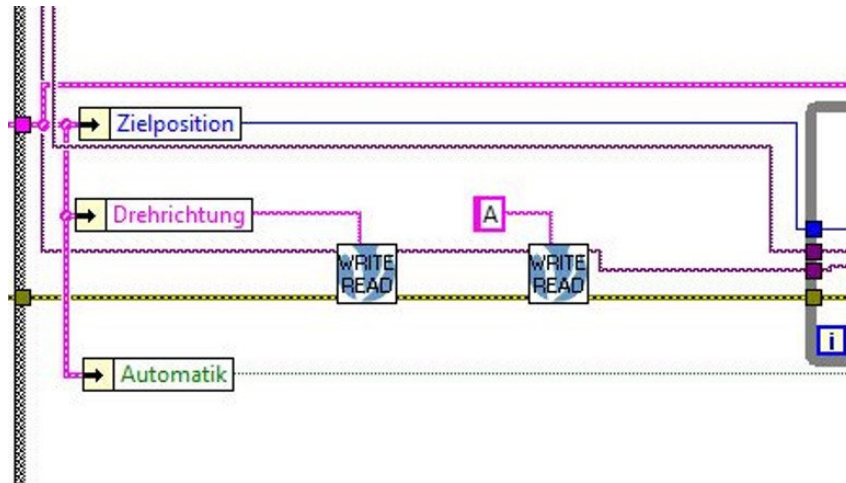


Abbildung 5.7: Erster Schritt des Zustandes „Fahren“

Die Zielposition wird aus dem Cluster gelesen und dem zweiten Schritt zur Verfügung gestellt. Mithilfe des Sub-VI's „Read_Write“ wird die Drehrichtung festgelegt und mit dem Befehl „A“ der Motor gestartet. Des Weiteren wird die boolesche Variable für „Automatik“ ausgelesen und dem dritten Schritt zur Verfügung gestellt.

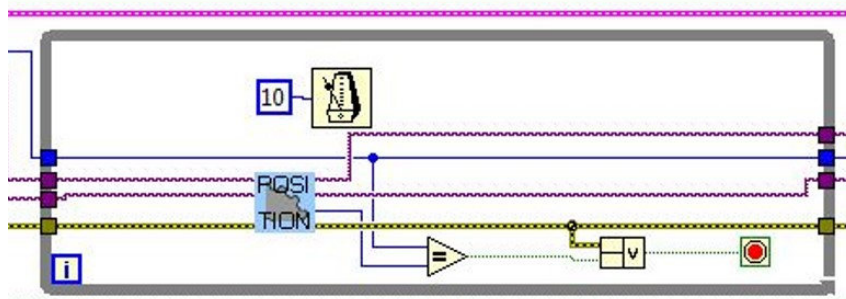


Abbildung 5.8: Zweiter Schritt des Zustandes „Fahren“

Im zweiten Schritt wird die derzeitige Position des Filtrerrades bestimmt und mit der Zielposition verglichen (siehe Abb. 5.8). Sobald die Positionen übereinstimmen (siehe Abb. 5.5), wird die While-Schleife beendet und der dritte Schritt wird ausgeführt.

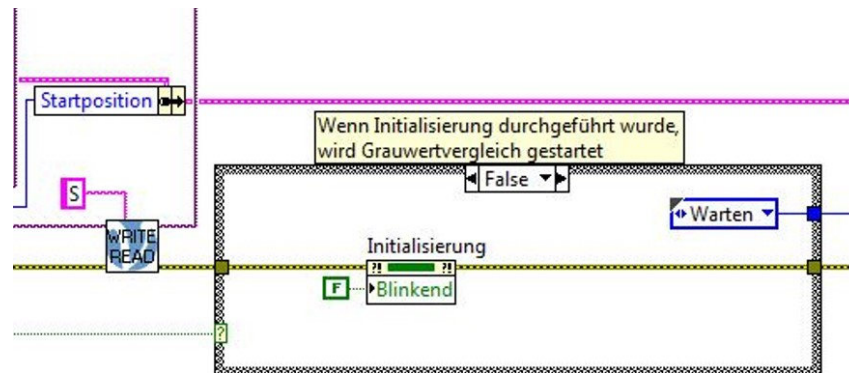


Abbildung 5.9: Dritter Schritt des Zustandes „Fahren“

Wie in Abb. 5.9 zu erkennen ist, wird die Zielposition als zukünftige Startposition übernommen und mit dem Befehl „S“ der Motor gestoppt. Da der Zustand „Fahren“ bei der Initialisierung, der manuellen Steuerung und der automatischen Steuerung aufgerufen wird, muss anschließend der nach dem Programmablauf vorgesehene Zustand aufgerufen werden. Wie bereits oben erwähnt, wird die boolesche Variable dem dritten Schritt zugeführt. Ist also der Automatik-Modus nicht aktiviert (False), wird der Zustand „Fahren“ entweder durch die Initialisierung oder den manuellen Modus aufgerufen. In beiden Fällen wird anschließend in den Zustand „Warten“ gewechselt. Ist der Automatik-Modus jedoch aktiviert, wird in den Zustand „Grauwertvergleich“ gewechselt.

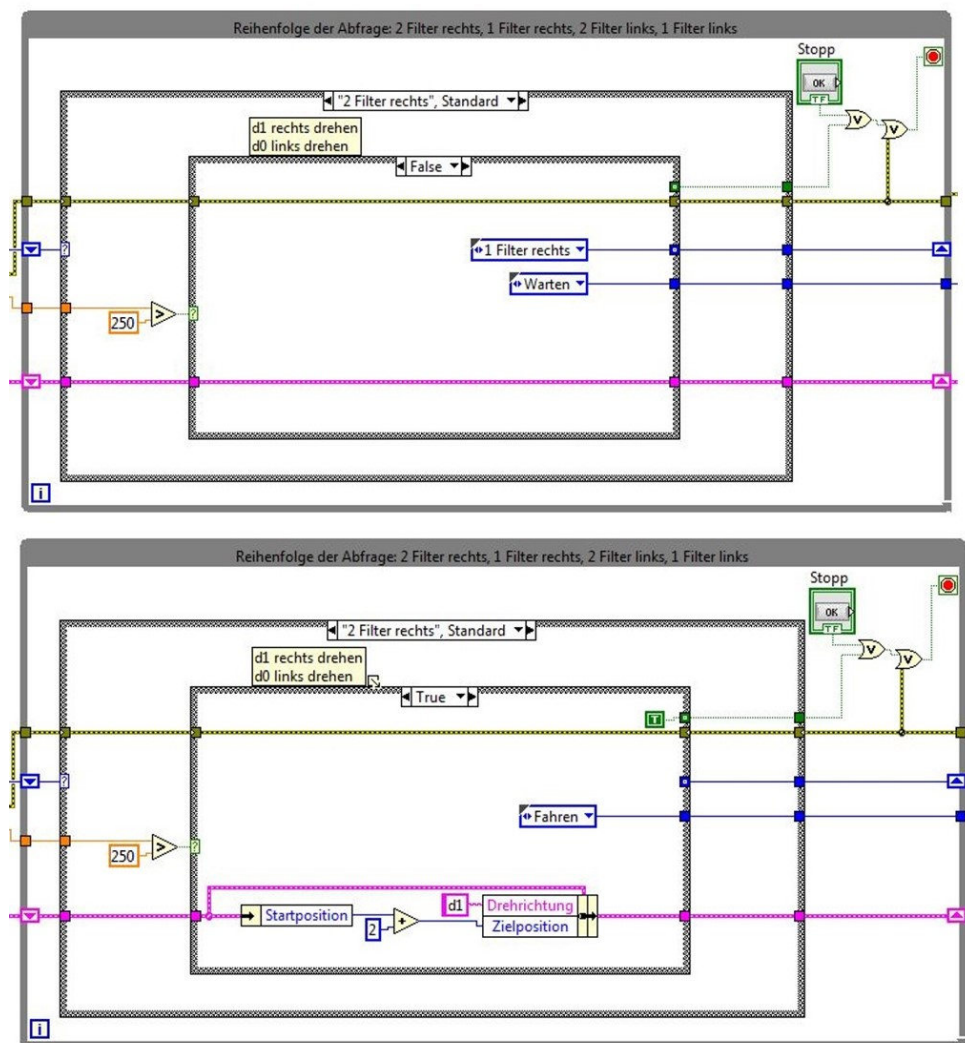


Abbildung 5.10: Struktur des Zustandes „Grauwertvergleich“

Abb. 5.10 zeigt die Struktur des Sub-VIs „Grauwertvergleich“. Zunächst wird der gemessene Grauwert mit einem festgelegten Grauwert verglichen. Sollte der gemessene Grauwert über 250 liegen, wird das Filterradd um 2 Positionen nach rechts gedreht, sodass ein stärkerer Filter eingesetzt wird. Ist dieser Wert jedoch kleiner als 250, wird der nächste Fall betrachtet. Wenn der Wert für den gemessenen Grauwert größer als 240 ist, wird das Filterradd um eine Position weitergedreht. Sollte dies nicht der Fall sein, wird überprüft, ob der Wert kleiner 60 ist. Bei einem Wert kleiner 60, ist die aktuelle Filtereinstellung zu stark, um den optimalen Grauwertbereich zwischen 110 bis 240 zu erreichen. Daher wird das Filterradd in diesem Fall um zwei Positionen zurückgedreht. Liegt der Wert zwischen 60 und 110, wird nur um eine Filterposition verändert. Wurden diese Fälle alle überprüft und keine Veränderung vorgenommen, befindet sich das Filterradd in einer optimalen Posi-

tion und der Grauwertvergleich wird erneut gestartet, um auf eine mögliche Veränderung zu reagieren. Wenn eine Veränderung der Filterposition durchgeführt werden muss, wird nach dem Grauwertvergleich der Zustand „Fahren“ aufgerufen und die Zielposition angesteuert. Nach Erreichen der Position wird wiederum in den Zustand „Grauwertvergleich“ gewechselt.

6 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein automatisiertes Filterradd zur Erweiterung der Messeinrichtung des Instituts für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt konstruiert. Zu den Aufgaben zählten die Konstruktion, die Auslegung der Antriebe und die Programmierung des Filterrades. Nach dem Zusammenbau des Filterrades wurde das Gesamtsystem zunächst auf seine Funktionalität überprüft. Das zu Testzwecken verwendete Objektiv der Firma Canon wurde mit der Messkamera der Firma Basler an das Filterradd montiert und auf die Position ohne Neutralschichtfilter gestellt. Im Vorfeld wurden Berechnungen und Tests durchgeführt, die den Einsatz von ND-Filter mit einem Durchmesser von $12,5\text{ mm}$ erlaubten. Im Praxistest stellte sich heraus, dass die Berechnungen richtig durchgeführt wurden und auf dem Kamerachip ist ein vollständig ausgeleuchtetes Bild sichtbar. Weiterhin ist festzustellen, dass die Konstruktion das notwendige Auflagemaß von 44 mm erfüllt und somit jederzeit ein scharfes Kamerabild zu erreichen ist. Das konstruierte Filterradd ist modular und kann sowohl mit einer alternativen Messkamera mit C-Mount Gewinde als auch mit einem alternativen Objektiv mit EF-Mount oder EF-S-Mount verwendet werden. Die geringe Baugröße und das geringe Gewicht machen das Filterradd transportabel.

Aufgrund von Lieferengpässen und der damit verbundenen zeitlichen Verzögerung, konnte das Gesamtsystem nicht in Gänze überprüft werden. Erste Tests am Versuchsstand des Sonnenofens zeigten ein positives Ergebnis. Die Initialisierung zu Beginn des Programms verläuft problemlos. Die Möglichkeit der manuellen Verstellung sowohl mit den Button „Weiter“ und „Zurück“ als auch die direkte Eingabe einer Filterposition sind durchführbar. Die automatische Filtereinstellung funktioniert, sollte jedoch hinsichtlich der Grauwertbereiche für die Entscheidung eines einfachen oder doppelten Filterwechsels verbessert werden.

Für die Integration des Filterrades in den gesamten Messprozess sollte zunächst ein Schaltschrank für die Motorsteuerung beschafft werden. Des Weiteren ist das Gesamtsystem in Gänze zu prüfen. Dazu sollte unter realen Versuchsbedingungen eine Vergleichsmessung zwischen der vorhandenen Messeinrichtung und der Messeinrichtung mit automatisiertem Filterradd durchgeführt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde bewiesen, dass eine Filterschrägstellung das Messergebnis beeinflusst. Wie bereits oben erwähnt, sollte der Grauwertbereich für die Filterverstellung optimiert werden. Die Software ist so vorzubereiten, dass sie in den Messablauf integriert werden kann. Für den transportablen Einsatz sollte ein Stativ konstruiert werden, welches eine horizontale und vertikale Verstellung des Filterrades ermöglicht. Dies erleichtert die Aufstellung und Ausrichtung des Filterrades.

Literatur

- [Bio16] BIOLANTIC SERVICES INC. *Optometry*. <http://www.biolantic.ca/services.php>". [Abrufdatum: 25.07.2016]
- [Bun16] BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN. *Optische Strahlung*. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Optische-Strahlung/Optische-Strahlung.html>". [Abrufdatum: 23.09.2016]
- [dlr16] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Solarforschung, Köln, 2016
- [Fis05] FISCHER, U.: *Tabellenbuch Metall*. 43. Auflage. Haan-Gruiten : Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer, 2005
- [GKV89] GERTHSEN, C. ; KNESER, H. ; VOGEL, H.: *Physik*. 16. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1989
- [HHU16] HEINRICH-HEINE-UNIVERSITÄT. *Elektromagnetisches Spektrum und sichtbares Licht*. http://www3.hhu.de/biodidaktik/Fotosynthese_neu/dateien/licht/licht.html/. [Abrufdatum: 26.07.2016]
- [Hoi05] HOISCHEN, W.: *Technisches Zeichnen*. 30. Auflage. Berlin : Cornelsen Verlag, 2005
- [Kuc91] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*. 13. Auflage. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig, 1991
- [Nan13] NANOTEC ELECTRONIC GMBH & CO. KG. *Programmierhandbuch für Schrittmotorsteuerung*. 2013
- [Nat16] NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW*. <http://www.ni.com/labview/d/>". [Abrufdatum: 24.11.2016]
- [Par16] PARADIGMA DEUTSCHLAND GMBH. *Globalstrahlung*. <http://www.paradigma.de/globalstrahlung>". [Abrufdatum: 24.05.2016]
- [Per16] PERKINELMER. *LAMBDA 950 UV/Vis/NIR Spectrophotometer*. <http://www.perkinelmer.de/product>. [Abrufdatum: 29.11.2016]
- [Pra16] PRATZNER, A. *Das Objektiv der Digitalkamera*. <http://www.foto-kurs.com/objektiv-digitalkamera.htm>". [Abrufdatum: 06.10.2016]

- [Pro16] PROPHOTO GMBH. *Der Crop-Factor - Brennweite und Sensorgröße.* <https://www.prophoto-online.de/index.php/fotopraxis/Der-Crop-Factor-Brennweite-und-Sensorgroesse-10006070>. [Abrufdatum: 27.10.2016]
- [SH12] STIEGLITZ, R. ; HEINZEL, V.: *Thermische Solarenergie.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012
- [SR15] SCHOLL, M. ; RUSSEK, U. *Skript zur Vorlesung Lasermaterialbearbeitung.* WS 2014/15
- [The16] THELEN, M.: *Entwicklung eines optischen Messsystems für Strahlungsflussdichteverteilung und Verifizierung anhand hochkonzentrierter Solarstrahlung.* Masterarbeit. Rheinische Fachhochschule Köln, 2016
- [Tho16] THORLABS. *Motorized Filter Wheels.* http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=988". [Abrufdatum: 24.05.2016]
- [Vis16] VISION DOCTOR. *Optische Grundlagen - Berechnung der Optik.* <http://www.vision-doctor.de/optische-grundlagen.html>". [Abrufdatum: 07.07.2016]
- [We11] WITTEL, H. ; [ET.AL.]: *Roloff/Matek Maschinenelemente - Lehrbuch, Tabellenbuch und Formelsammlung.* 20. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011

A Anhang Messwerte

Messung	Wellenlänge [nm]	Rohdaten					Ausgewertete Daten			
		Referenz	Nulllinie	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
Transmission ND1	1000	126,740	0,347	0,552	0,524	0,529	0,162	0,140	0,144	0,149
	995	127,294	0,235	0,478	0,412	0,406	0,191	0,139	0,134	0,155
	990	127,954	-0,001	0,255	0,254	0,235	0,201	0,200	0,185	0,195
	985	128,486	0,066	0,294	0,304	0,311	0,177	0,185	0,191	0,184
	980	129,093	0,151	0,383	0,365	0,370	0,180	0,166	0,170	0,172
	975	129,701	0,178	0,402	0,410	0,379	0,173	0,179	0,155	0,169
	970	130,326	0,187	0,354	0,407	0,390	0,128	0,169	0,156	0,151
	965	130,911	0,173	0,380	0,422	0,399	0,158	0,190	0,173	0,174
	960	131,577	0,186	0,433	0,433	0,449	0,188	0,188	0,200	0,192
	955	132,230	0,215	0,457	0,439	0,464	0,183	0,170	0,189	0,181
	950	132,862	0,257	0,450	0,447	0,441	0,145	0,143	0,138	0,142
	945	133,692	0,251	0,471	0,428	0,469	0,165	0,132	0,163	0,153
	940	134,610	0,272	0,468	0,474	0,507	0,146	0,150	0,175	0,157
	935	135,594	0,268	0,476	0,488	0,483	0,154	0,163	0,159	0,159
	930	136,588	0,252	0,484	0,459	0,474	0,170	0,152	0,163	0,162
	925	137,552	0,284	0,482	0,480	0,509	0,144	0,143	0,164	0,151
	920	138,504	0,302	0,524	0,503	0,538	0,161	0,146	0,171	0,159
	915	139,537	0,373	0,588	0,557	0,539	0,155	0,132	0,119	0,136
	910	140,729	0,396	0,599	0,562	0,543	0,145	0,119	0,105	0,123
	905	141,806	0,309	0,537	0,540	0,593	0,161	0,163	0,200	0,175
	900	142,782	0,408	0,510	0,585	0,620	0,072	0,124	0,149	0,115
	895	144,092	0,480	0,651	0,616	0,661	0,119	0,095	0,127	0,114
	890	145,698	0,457	0,659	0,656	0,624	0,139	0,137	0,115	0,130
	885	147,116	0,391	0,504	0,525	0,476	0,077	0,091	0,058	0,075
	880	148,029	0,361	0,637	0,440	0,655	0,187	0,054	0,199	0,147
	875	149,401	0,415	0,561	0,557	0,676	0,099	0,096	0,175	0,123
	870	151,109	0,137	0,408	0,577	0,483	0,180	0,292	0,229	0,234
	865	152,182	0,363	0,419	0,455	0,403	0,037	0,060	0,026	0,041
	860	153,467	0,601	0,469	0,700	0,483	-0,086	0,065	-0,077	-0,033
	855	154,978	0,213	0,410	0,639	0,439	0,127	0,275	0,146	0,183
	850	155,853	-0,004	0,226	0,225	0,223	0,147	0,146	0,145	0,146
	845	156,292	-0,006	0,244	0,238	0,237	0,160	0,156	0,155	0,157
	840	156,678	-0,007	0,234	0,231	0,233	0,154	0,152	0,153	0,153
	835	157,067	-0,002	0,227	0,222	0,225	0,146	0,142	0,144	0,144
	830	157,165	-0,003	0,222	0,218	0,218	0,143	0,141	0,141	0,142
	825	156,899	-0,009	0,216	0,213	0,212	0,144	0,141	0,141	0,142
	820	156,514	-0,005	0,212	0,208	0,206	0,139	0,136	0,135	0,137
	815	155,927	-0,003	0,209	0,206	0,203	0,136	0,134	0,132	0,134
	810	155,163	-0,011	0,203	0,201	0,198	0,138	0,137	0,135	0,136
	805	154,377	-0,016	0,197	0,192	0,194	0,138	0,135	0,136	0,136
	800	153,540	-0,013	0,193	0,189	0,192	0,134	0,132	0,133	0,133
	795	152,584	-0,008	0,193	0,190	0,190	0,131	0,129	0,130	0,130
	790	151,610	-0,007	0,191	0,187	0,189	0,130	0,128	0,129	0,129
	785	150,565	-0,004	0,187	0,184	0,185	0,127	0,125	0,126	0,126
	780	149,528	-0,003	0,183	0,179	0,182	0,124	0,122	0,124	0,123
	775	148,426	-0,005	0,180	0,177	0,180	0,125	0,123	0,125	0,124
	770	147,342	-0,008	0,178	0,173	0,176	0,126	0,123	0,124	0,124
	765	146,387	-0,007	0,175	0,171	0,172	0,124	0,122	0,122	0,122
	760	145,449	-0,006	0,172	0,171	0,170	0,122	0,121	0,120	0,121
	755	144,416	-0,008	0,170	0,168	0,167	0,123	0,122	0,121	0,122
	750	143,471	-0,008	0,167	0,164	0,165	0,122	0,120	0,121	0,121
	745	142,575	-0,007	0,165	0,159	0,162	0,121	0,117	0,119	0,119
	740	141,676	-0,008	0,162	0,158	0,160	0,120	0,117	0,119	0,119
	735	140,926	-0,007	0,160	0,156	0,157	0,119	0,116	0,117	0,117
	730	140,175	-0,008	0,158	0,152	0,153	0,118	0,114	0,115	0,116
	725	139,385	-0,009	0,155	0,152	0,152	0,117	0,115	0,115	0,116
	720	138,615	-0,009	0,154	0,150	0,151	0,117	0,114	0,115	0,116
	715	137,918	-0,009	0,152	0,147	0,150	0,117	0,113	0,115	0,115
	710	137,233	-0,008	0,151	0,146	0,147	0,115	0,112	0,113	0,113
	705	136,583	-0,008	0,148	0,145	0,144	0,114	0,112	0,112	0,113
	700	135,985	-0,009	0,145	0,143	0,142	0,113	0,112	0,111	0,112
	695	135,369	-0,008	0,144	0,139	0,141	0,112	0,109	0,110	0,110
	690	134,770	-0,008	0,142	0,138	0,139	0,111	0,108	0,109	0,109
	685	134,257	-0,011	0,141	0,136	0,137	0,113	0,109	0,110	0,111
	680	133,744	-0,009	0,141	0,135	0,136	0,112	0,107	0,108	0,109
	675	133,234	-0,007	0,140	0,137	0,136	0,111	0,108	0,108	0,109
	670	132,763	-0,010	0,138	0,136	0,136	0,112	0,109	0,110	0,110
	665	132,237	-0,008	0,136	0,134	0,134	0,109	0,107	0,108	0,108
	660	131,765	-0,008	0,135	0,133	0,133	0,109	0,106	0,107	0,107
	655	131,363	-0,010	0,134	0,131	0,132	0,109	0,107	0,108	0,108

650	130,943	-0,008	0,134	0,130	0,131	0,108	0,105	0,106	0,106
645	130,554	-0,008	0,134	0,131	0,132	0,108	0,106	0,107	0,107
640	130,202	-0,010	0,133	0,131	0,131	0,110	0,108	0,109	0,109
635	129,829	-0,010	0,132	0,128	0,129	0,109	0,106	0,107	0,107
630	129,467	-0,009	0,131	0,127	0,129	0,108	0,106	0,107	0,107
625	129,165	-0,011	0,130	0,128	0,128	0,109	0,107	0,107	0,108
620	128,857	-0,009	0,129	0,127	0,127	0,108	0,106	0,106	0,106
615	128,525	-0,009	0,129	0,126	0,127	0,107	0,105	0,106	0,106
610	128,282	-0,009	0,128	0,126	0,126	0,107	0,105	0,106	0,106
605	128,033	-0,009	0,127	0,125	0,124	0,106	0,104	0,104	0,105
600	127,769	-0,010	0,127	0,125	0,125	0,107	0,105	0,106	0,106
595	127,536	-0,010	0,127	0,125	0,126	0,108	0,106	0,107	0,107
590	127,332	-0,008	0,126	0,124	0,125	0,105	0,104	0,104	0,104
585	127,180	-0,008	0,125	0,124	0,125	0,105	0,104	0,104	0,104
580	126,988	-0,009	0,125	0,124	0,124	0,106	0,105	0,105	0,105
575	126,762	-0,010	0,126	0,123	0,123	0,107	0,105	0,105	0,105
570	126,616	-0,011	0,126	0,123	0,123	0,108	0,105	0,106	0,106
565	126,507	-0,012	0,124	0,122	0,122	0,107	0,105	0,106	0,106
560	126,359	-0,011	0,124	0,120	0,120	0,107	0,103	0,104	0,104
555	126,311	-0,012	0,124	0,120	0,120	0,107	0,104	0,104	0,105
550	126,243	-0,009	0,126	0,122	0,123	0,107	0,104	0,105	0,105
545	126,157	-0,008	0,127	0,124	0,124	0,107	0,104	0,105	0,105
540	126,090	-0,009	0,126	0,124	0,124	0,107	0,105	0,105	0,106
535	125,994	-0,007	0,124	0,122	0,123	0,104	0,102	0,103	0,103
530	125,923	-0,009	0,123	0,121	0,122	0,104	0,103	0,103	0,104
525	125,856	-0,013	0,122	0,120	0,120	0,107	0,105	0,105	0,106
520	125,807	-0,013	0,119	0,117	0,117	0,105	0,103	0,103	0,104
515	125,808	-0,017	0,116	0,115	0,113	0,106	0,105	0,103	0,104
510	125,845	-0,022	0,112	0,112	0,110	0,107	0,107	0,105	0,106
505	125,910	-0,022	0,110	0,108	0,108	0,104	0,103	0,103	0,103
500	126,026	-0,021	0,111	0,110	0,109	0,105	0,103	0,103	0,104
495	126,218	-0,018	0,117	0,116	0,115	0,107	0,106	0,106	0,106
490	126,354	-0,010	0,123	0,122	0,121	0,106	0,105	0,104	0,105
485	126,519	-0,003	0,132	0,130	0,128	0,107	0,104	0,103	0,105
480	126,672	-0,003	0,133	0,132	0,131	0,108	0,106	0,106	0,107
475	126,783	-0,008	0,127	0,126	0,126	0,107	0,106	0,105	0,106
470	126,990	-0,014	0,122	0,120	0,120	0,107	0,106	0,106	0,106
465	127,247	-0,020	0,116	0,115	0,115	0,107	0,106	0,106	0,106
460	127,516	-0,020	0,113	0,112	0,112	0,105	0,104	0,104	0,104
455	127,855	-0,021	0,115	0,115	0,114	0,106	0,106	0,105	0,106
450	128,290	-0,020	0,119	0,118	0,119	0,108	0,108	0,108	0,108
445	128,798	-0,012	0,126	0,125	0,127	0,107	0,106	0,108	0,107
440	129,311	-0,009	0,131	0,129	0,130	0,108	0,107	0,108	0,108
435	129,845	-0,013	0,132	0,130	0,129	0,112	0,111	0,109	0,111
430	130,367	-0,011	0,132	0,131	0,129	0,110	0,109	0,107	0,109
425	130,972	-0,010	0,134	0,133	0,131	0,110	0,109	0,107	0,109
420	131,640	-0,014	0,135	0,134	0,132	0,113	0,112	0,111	0,112
415	132,343	-0,014	0,136	0,135	0,133	0,113	0,113	0,111	0,112
410	133,137	-0,017	0,137	0,136	0,133	0,115	0,114	0,113	0,114
405	133,985	-0,020	0,139	0,136	0,135	0,118	0,116	0,116	0,116
400	134,879	-0,018	0,139	0,138	0,137	0,116	0,115	0,115	0,115
395	135,735	-0,018	0,140	0,141	0,138	0,116	0,117	0,115	0,116
390	136,558	-0,019	0,143	0,139	0,140	0,119	0,116	0,116	0,117
385	137,335	-0,018	0,142	0,139	0,139	0,116	0,114	0,114	0,115
380	137,859	-0,018	0,142	0,140	0,140	0,116	0,115	0,115	0,115
375	138,045	-0,008	0,147	0,150	0,145	0,112	0,114	0,111	0,113
370	138,320	-0,046	0,163	0,160	0,162	0,151	0,149	0,150	0,150
365	138,196	-0,035	0,162	0,164	0,162	0,143	0,144	0,143	0,143
360	137,491	-0,027	0,147	0,150	0,150	0,126	0,129	0,128	0,128
355	136,581	-0,007	0,137	0,137	0,134	0,105	0,105	0,103	0,104
350	135,529	0,017	0,121	0,122	0,122	0,077	0,078	0,078	0,078
345	134,767	0,036	0,108	0,098	0,108	0,054	0,046	0,054	0,051
340	133,763	0,032	0,104	0,094	0,085	0,054	0,046	0,040	0,047
335	132,030	0,016	0,086	0,074	0,071	0,053	0,044	0,042	0,046
330	130,360	0,001	0,054	0,038	0,051	0,041	0,028	0,038	0,036
325	128,844	0,014	0,024	0,016	0,024	0,008	0,001	0,007	0,005
320	127,729	0,197	0,002	-0,008	-0,002	-0,153	-0,160	-0,156	-0,156
315	126,944	0,134	0,000	-0,008	-0,004	-0,105	-0,112	-0,108	-0,108
310	126,058	-0,010	0,001	-0,002	0,002	0,008	0,006	0,010	0,008
305	125,173	-0,012	-0,005	-0,006	-0,003	0,005	0,005	0,007	0,006
300	124,467	-0,010	-0,006	-0,008	-0,006	0,003	0,002	0,003	0,003
295	123,864	-0,004	0,000	-0,003	-0,003	0,004	0,001	0,001	0,002
290	123,429	-0,006	-0,002	-0,003	-0,007	0,003	0,002	-0,001	0,001

	285	123,515	-0,011	-0,011	-0,007	-0,009	0,000	0,003	0,002	0,002
	280	124,251	-0,008	-0,012	-0,011	-0,011	-0,003	-0,002	-0,002	-0,002
	275	125,849	-0,012	-0,016	-0,017	-0,016	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003
	270	128,482	-0,020	-0,019	-0,022	-0,017	0,001	-0,001	0,002	0,001
	265	132,025	-0,011	-0,017	-0,021	-0,020	-0,005	-0,007	-0,007	-0,006
	260	137,011	-0,015	-0,019	-0,016	-0,023	-0,002	-0,001	-0,006	-0,003
	255	144,157	-0,015	-0,016	-0,014	-0,020	-0,001	0,001	-0,004	-0,001
	250	154,800	0,018	0,011	0,011	0,007	-0,005	-0,005	-0,007	-0,006
Transmission ND2	1000	126,740	0,347	0,927	0,732	0,900	0,459	0,305	0,438	0,400
	995	127,294	0,235	0,798	0,591	0,799	0,443	0,280	0,444	0,389
	990	127,954	-0,001	0,620	0,451	0,625	0,486	0,354	0,489	0,443
	985	128,486	0,066	0,675	0,511	0,679	0,474	0,347	0,478	0,433
	980	129,093	0,151	0,742	0,562	0,746	0,458	0,318	0,461	0,413
	975	129,701	0,178	0,773	0,604	0,794	0,459	0,329	0,475	0,421
	970	130,326	0,187	0,794	0,599	0,762	0,466	0,316	0,442	0,408
	965	130,911	0,173	0,805	0,648	0,802	0,483	0,363	0,481	0,443
	960	131,577	0,186	0,813	0,646	0,850	0,477	0,350	0,506	0,444
	955	132,230	0,215	0,887	0,668	0,855	0,509	0,343	0,485	0,446
	950	132,862	0,257	0,878	0,692	0,857	0,468	0,328	0,452	0,416
	945	133,692	0,251	0,837	0,707	0,879	0,439	0,341	0,470	0,417
	940	134,610	0,272	0,839	0,740	0,902	0,422	0,348	0,469	0,413
	935	135,594	0,268	0,897	0,747	0,892	0,465	0,354	0,461	0,427
	930	136,588	0,252	0,919	0,702	0,895	0,489	0,330	0,471	0,430
	925	137,552	0,284	0,899	0,686	0,929	0,449	0,293	0,470	0,404
	920	138,504	0,302	0,913	0,736	0,931	0,442	0,315	0,456	0,404
	915	139,537	0,373	0,941	0,744	0,968	0,409	0,267	0,427	0,368
	910	140,729	0,396	0,936	0,729	0,964	0,385	0,238	0,405	0,343
	905	141,806	0,309	0,914	0,771	0,977	0,427	0,326	0,472	0,408
	900	142,782	0,408	0,977	0,858	1,022	0,400	0,317	0,431	0,383
	895	144,092	0,480	1,145	0,848	1,014	0,463	0,257	0,372	0,364
	890	145,698	0,457	1,117	0,808	1,003	0,455	0,242	0,376	0,358
	885	147,116	0,391	1,018	0,761	1,024	0,427	0,252	0,431	0,370
	880	148,029	0,361	0,980	0,788	1,016	0,420	0,290	0,444	0,384
	875	149,401	0,415	0,979	0,710	1,038	0,379	0,198	0,418	0,332
	870	151,109	0,137	0,992	0,700	0,893	0,567	0,373	0,501	0,480
	865	152,182	0,363	0,889	0,653	0,833	0,346	0,191	0,309	0,282
	860	153,467	0,601	0,971	0,827	1,012	0,242	0,148	0,269	0,220
	855	154,978	0,213	0,909	0,823	0,871	0,450	0,394	0,425	0,423
	850	155,853	-0,004	0,709	0,484	0,696	0,457	0,313	0,449	0,406
	845	156,292	-0,006	0,718	0,486	0,711	0,463	0,315	0,458	0,412
	840	156,678	-0,007	0,721	0,487	0,705	0,464	0,315	0,454	0,411
	835	157,067	-0,002	0,711	0,483	0,701	0,454	0,309	0,448	0,403
	830	157,165	-0,003	0,704	0,475	0,688	0,450	0,305	0,440	0,398
	825	156,899	-0,009	0,703	0,476	0,684	0,454	0,310	0,442	0,402
	820	156,514	-0,005	0,693	0,468	0,683	0,446	0,302	0,440	0,396
	815	155,927	-0,003	0,688	0,461	0,675	0,444	0,298	0,435	0,392
	810	155,163	-0,011	0,685	0,456	0,668	0,448	0,301	0,437	0,396
	805	154,377	-0,016	0,676	0,451	0,661	0,448	0,302	0,439	0,396
	800	153,540	-0,013	0,670	0,449	0,657	0,445	0,301	0,436	0,394
	795	152,584	-0,008	0,671	0,445	0,653	0,444	0,297	0,433	0,391
	790	151,610	-0,007	0,666	0,441	0,646	0,444	0,295	0,431	0,390
	785	150,565	-0,004	0,656	0,433	0,643	0,438	0,290	0,430	0,386
	780	149,528	-0,003	0,650	0,430	0,640	0,436	0,290	0,430	0,385
	775	148,426	-0,005	0,645	0,429	0,633	0,438	0,293	0,430	0,387
	770	147,342	-0,008	0,636	0,421	0,627	0,437	0,291	0,430	0,386
	765	146,387	-0,007	0,628	0,417	0,620	0,433	0,289	0,428	0,384
	760	145,449	-0,006	0,625	0,414	0,612	0,434	0,288	0,424	0,382
	755	144,416	-0,008	0,622	0,406	0,606	0,436	0,287	0,425	0,382
	750	143,471	-0,008	0,615	0,403	0,602	0,434	0,286	0,425	0,382
	745	142,575	-0,007	0,609	0,401	0,597	0,432	0,286	0,423	0,381
	740	141,676	-0,008	0,603	0,395	0,592	0,431	0,285	0,423	0,380
	735	140,926	-0,007	0,599	0,392	0,589	0,430	0,284	0,423	0,379
	730	140,175	-0,008	0,596	0,389	0,584	0,431	0,283	0,423	0,379
	725	139,385	-0,009	0,593	0,386	0,582	0,432	0,283	0,423	0,379
	720	138,615	-0,009	0,589	0,385	0,577	0,431	0,284	0,423	0,379
	715	137,918	-0,009	0,586	0,381	0,571	0,431	0,283	0,421	0,378
	710	137,233	-0,008	0,584	0,375	0,568	0,431	0,279	0,419	0,376
	705	136,583	-0,008	0,579	0,373	0,564	0,430	0,279	0,418	0,376
	700	135,985	-0,009	0,574	0,373	0,559	0,428	0,281	0,418	0,376
	695	135,369	-0,008	0,570	0,369	0,557	0,427	0,278	0,417	0,374
	690	134,770	-0,008	0,569	0,366	0,557	0,428	0,277	0,419	0,375
	685	134,257	-0,011	0,565	0,365	0,552	0,429	0,279	0,419	0,376
	680	133,744	-0,009	0,564	0,363	0,549	0,428	0,278	0,417	0,374

675	133,234	-0,007	0,564	0,363	0,550	0,428	0,278	0,418	0,375
670	132,763	-0,010	0,560	0,361	0,547	0,429	0,279	0,419	0,376
665	132,237	-0,008	0,558	0,358	0,545	0,428	0,277	0,418	0,374
660	131,765	-0,008	0,557	0,356	0,543	0,428	0,276	0,418	0,374
655	131,363	-0,010	0,555	0,356	0,541	0,430	0,278	0,419	0,376
650	130,943	-0,008	0,553	0,354	0,540	0,428	0,276	0,418	0,374
645	130,554	-0,008	0,551	0,353	0,539	0,428	0,276	0,419	0,374
640	130,202	-0,010	0,549	0,353	0,538	0,429	0,279	0,421	0,376
635	129,829	-0,010	0,546	0,350	0,536	0,428	0,277	0,420	0,375
630	129,467	-0,009	0,545	0,350	0,532	0,428	0,277	0,418	0,375
625	129,165	-0,011	0,545	0,350	0,531	0,431	0,279	0,419	0,376
620	128,857	-0,009	0,544	0,347	0,529	0,429	0,276	0,418	0,375
615	128,525	-0,009	0,542	0,345	0,530	0,429	0,275	0,419	0,374
610	128,282	-0,009	0,542	0,346	0,530	0,430	0,276	0,420	0,375
605	128,033	-0,009	0,541	0,345	0,529	0,429	0,276	0,420	0,375
600	127,769	-0,010	0,541	0,345	0,528	0,431	0,278	0,421	0,377
595	127,536	-0,010	0,541	0,345	0,527	0,432	0,279	0,421	0,377
590	127,332	-0,008	0,539	0,342	0,526	0,430	0,275	0,419	0,375
585	127,180	-0,008	0,538	0,342	0,525	0,429	0,275	0,419	0,375
580	126,988	-0,009	0,537	0,344	0,525	0,430	0,278	0,421	0,376
575	126,762	-0,010	0,537	0,342	0,523	0,431	0,277	0,420	0,376
570	126,616	-0,011	0,538	0,341	0,522	0,433	0,277	0,421	0,377
565	126,507	-0,012	0,536	0,342	0,521	0,433	0,279	0,421	0,378
560	126,359	-0,011	0,532	0,340	0,519	0,430	0,277	0,419	0,375
555	126,311	-0,012	0,534	0,340	0,522	0,432	0,279	0,422	0,377
550	126,243	-0,009	0,538	0,345	0,525	0,433	0,280	0,423	0,379
545	126,157	-0,008	0,539	0,347	0,525	0,433	0,281	0,423	0,379
540	126,090	-0,009	0,538	0,346	0,525	0,434	0,281	0,424	0,380
535	125,994	-0,007	0,537	0,344	0,525	0,432	0,278	0,422	0,377
530	125,923	-0,009	0,536	0,343	0,524	0,432	0,279	0,423	0,378
525	125,856	-0,013	0,535	0,342	0,523	0,435	0,282	0,426	0,381
520	125,807	-0,013	0,533	0,339	0,521	0,434	0,280	0,425	0,379
515	125,808	-0,017	0,529	0,337	0,518	0,434	0,281	0,425	0,380
510	125,845	-0,022	0,525	0,336	0,515	0,435	0,284	0,427	0,382
505	125,910	-0,022	0,523	0,333	0,514	0,432	0,282	0,426	0,380
500	126,026	-0,021	0,527	0,334	0,515	0,435	0,281	0,425	0,380
495	126,218	-0,018	0,533	0,339	0,521	0,437	0,283	0,427	0,382
490	126,354	-0,010	0,541	0,346	0,528	0,436	0,282	0,426	0,382
485	126,519	-0,003	0,551	0,355	0,537	0,437	0,283	0,426	0,382
480	126,672	-0,003	0,552	0,357	0,538	0,438	0,284	0,427	0,383
475	126,783	-0,008	0,546	0,350	0,534	0,437	0,282	0,427	0,382
470	126,990	-0,014	0,542	0,344	0,529	0,438	0,282	0,428	0,383
465	127,247	-0,020	0,538	0,342	0,526	0,438	0,284	0,428	0,383
460	127,516	-0,020	0,536	0,341	0,526	0,436	0,283	0,428	0,382
455	127,855	-0,021	0,542	0,343	0,529	0,440	0,284	0,430	0,385
450	128,290	-0,020	0,547	0,348	0,535	0,442	0,286	0,432	0,387
445	128,798	-0,012	0,556	0,355	0,547	0,441	0,285	0,433	0,386
440	129,311	-0,009	0,562	0,361	0,553	0,442	0,287	0,435	0,388
435	129,845	-0,013	0,564	0,364	0,553	0,444	0,290	0,436	0,390
430	130,367	-0,011	0,564	0,365	0,555	0,441	0,288	0,434	0,388
425	130,972	-0,010	0,568	0,367	0,559	0,441	0,288	0,434	0,388
420	131,640	-0,014	0,574	0,370	0,561	0,446	0,291	0,436	0,391
415	132,343	-0,014	0,580	0,372	0,566	0,449	0,292	0,439	0,393
410	133,137	-0,017	0,582	0,375	0,571	0,449	0,294	0,441	0,395
405	133,985	-0,020	0,585	0,379	0,574	0,451	0,297	0,443	0,397
400	134,879	-0,018	0,592	0,381	0,579	0,452	0,296	0,442	0,397
395	135,735	-0,018	0,597	0,385	0,585	0,453	0,297	0,444	0,398
390	136,558	-0,019	0,600	0,388	0,589	0,454	0,298	0,446	0,399
385	137,335	-0,018	0,603	0,386	0,593	0,452	0,294	0,444	0,397
380	137,859	-0,018	0,606	0,390	0,594	0,453	0,296	0,444	0,398
375	138,045	-0,008	0,616	0,406	0,598	0,452	0,300	0,439	0,397
370	138,320	-0,046	0,634	0,418	0,622	0,491	0,335	0,483	0,437
365	138,196	-0,035	0,630	0,417	0,621	0,481	0,327	0,474	0,427
360	137,491	-0,027	0,611	0,413	0,602	0,463	0,320	0,457	0,413
355	136,581	-0,007	0,593	0,403	0,587	0,439	0,300	0,435	0,391
350	135,529	0,017	0,576	0,383	0,561	0,413	0,271	0,402	0,362
345	134,767	0,036	0,566	0,365	0,536	0,394	0,244	0,371	0,336
340	133,763	0,032	0,549	0,354	0,512	0,387	0,241	0,359	0,329
335	132,030	0,016	0,497	0,355	0,489	0,364	0,257	0,359	0,327
330	130,360	0,001	0,450	0,300	0,447	0,344	0,229	0,342	0,305
325	128,844	0,014	0,392	0,250	0,391	0,293	0,183	0,292	0,256
320	127,729	0,197	0,335	0,222	0,336	0,109	0,020	0,109	0,079
315	126,944	0,134	0,297	0,182	0,294	0,129	0,038	0,126	0,098

	310	126,058	-0,010	0,234	0,139	0,237	0,194	0,118	0,196	0,169
	305	125,173	-0,012	0,156	0,090	0,156	0,134	0,081	0,134	0,116
	300	124,467	-0,010	0,087	0,048	0,086	0,078	0,047	0,077	0,067
	295	123,864	-0,004	0,043	0,025	0,042	0,038	0,024	0,037	0,033
	290	123,429	-0,006	0,019	0,008	0,015	0,020	0,011	0,017	0,016
	285	123,515	-0,011	0,005	-0,005	0,004	0,013	0,005	0,012	0,010
	280	124,251	-0,008	-0,007	-0,012	-0,001	0,001	-0,003	0,006	0,001
	275	125,849	-0,012	-0,011	-0,016	-0,006	0,001	-0,003	0,005	0,001
	270	128,482	-0,020	-0,010	-0,020	-0,010	0,008	0,000	0,008	0,005
	265	132,025	-0,011	-0,014	-0,022	-0,010	-0,002	-0,008	0,001	-0,003
	260	137,011	-0,015	-0,014	-0,020	-0,007	0,001	-0,003	0,006	0,001
	255	144,157	-0,015	-0,009	-0,014	-0,002	0,004	0,001	0,009	0,005
	250	154,800	0,018	0,019	0,017	0,031	0,001	-0,001	0,008	0,003
Transmission ND3	1000	126,740	0,347	25,189	25,300	25,345	19,654	19,743	19,778	19,725
	995	127,294	0,235	25,203	25,266	25,315	19,650	19,700	19,738	19,696
	990	127,954	-0,001	25,127	25,215	25,268	19,638	19,707	19,749	19,698
	985	128,486	0,066	25,282	25,402	25,409	19,636	19,729	19,734	19,700
	980	129,093	0,151	25,428	25,558	25,582	19,604	19,704	19,723	19,677
	975	129,701	0,178	25,563	25,684	25,710	19,598	19,692	19,712	19,667
	970	130,326	0,187	25,684	25,781	25,819	19,592	19,666	19,696	19,651
	965	130,911	0,173	25,833	25,931	25,958	19,627	19,702	19,723	19,684
	960	131,577	0,186	25,974	26,108	26,102	19,627	19,729	19,725	19,694
	955	132,230	0,215	26,135	26,258	26,263	19,634	19,727	19,731	19,698
	950	132,862	0,257	26,299	26,410	26,421	19,639	19,722	19,731	19,697
	945	133,692	0,251	26,475	26,556	26,594	19,652	19,712	19,741	19,702
	940	134,610	0,272	26,680	26,722	26,780	19,658	19,689	19,732	19,693
	935	135,594	0,268	26,851	26,929	26,962	19,644	19,702	19,726	19,691
	930	136,588	0,252	27,030	27,170	27,154	19,641	19,743	19,732	19,706
	925	137,552	0,284	27,205	27,364	27,362	19,612	19,728	19,727	19,689
	920	138,504	0,302	27,415	27,545	27,575	19,619	19,713	19,734	19,689
	915	139,537	0,373	27,680	27,760	27,847	19,623	19,680	19,742	19,682
	910	140,729	0,396	27,909	28,017	28,015	19,606	19,683	19,682	19,657
	905	141,806	0,309	28,128	28,298	28,231	19,660	19,780	19,733	19,725
	900	142,782	0,408	28,385	28,540	28,557	19,650	19,759	19,771	19,727
	895	144,092	0,480	28,749	28,758	28,816	19,684	19,690	19,731	19,702
	890	145,698	0,457	29,018	28,979	29,049	19,665	19,638	19,686	19,663
	885	147,116	0,391	29,309	29,349	29,294	19,709	19,736	19,699	19,714
	880	148,029	0,361	29,534	29,560	29,668	19,756	19,774	19,847	19,792
	875	149,401	0,415	29,688	29,828	29,918	19,648	19,742	19,803	19,731
	870	151,109	0,137	29,912	30,149	30,029	19,722	19,879	19,800	19,801
	865	152,182	0,363	30,080	30,216	30,243	19,574	19,663	19,681	19,639
	860	153,467	0,601	30,370	30,522	30,460	19,474	19,573	19,533	19,527
	855	154,978	0,213	30,432	30,568	30,499	19,526	19,614	19,569	19,570
	850	155,853	-0,004	30,416	30,497	30,536	19,518	19,569	19,595	19,561
	845	156,292	-0,006	30,601	30,717	30,680	19,582	19,656	19,633	19,624
	840	156,678	-0,007	30,673	30,812	30,789	19,581	19,669	19,655	19,635
	835	157,067	-0,002	30,689	30,867	30,843	19,540	19,653	19,638	19,610
	830	157,165	-0,003	30,702	30,876	30,854	19,537	19,647	19,633	19,606
	825	156,899	-0,009	30,673	30,831	30,846	19,555	19,655	19,665	19,625
	820	156,514	-0,005	30,634	30,757	30,787	19,576	19,654	19,673	19,634
	815	155,927	-0,003	30,567	30,664	30,687	19,605	19,667	19,682	19,651
	810	155,163	-0,011	30,482	30,589	30,545	19,651	19,720	19,691	19,687
	805	154,377	-0,016	30,325	30,458	30,427	19,652	19,738	19,718	19,703
	800	153,540	-0,013	30,144	30,295	30,301	19,639	19,737	19,741	19,706
	795	152,584	-0,008	29,982	30,153	30,128	19,653	19,765	19,749	19,722
	790	151,610	-0,007	29,810	29,990	29,987	19,666	19,785	19,782	19,744
	785	150,565	-0,004	29,679	29,822	29,846	19,714	19,809	19,825	19,783
	780	149,528	-0,003	29,498	29,665	29,659	19,729	19,841	19,837	19,802
	775	148,426	-0,005	29,323	29,481	29,482	19,759	19,865	19,866	19,830
	770	147,342	-0,008	29,181	29,316	29,317	19,809	19,901	19,902	19,870
	765	146,387	-0,007	29,020	29,164	29,162	19,828	19,926	19,925	19,893
	760	145,449	-0,006	28,847	29,007	29,011	19,836	19,946	19,949	19,911
	755	144,416	-0,008	28,708	28,867	28,858	19,883	19,993	19,987	19,954
	750	143,471	-0,008	28,596	28,717	28,718	19,936	20,020	20,021	19,992
	745	142,575	-0,007	28,451	28,573	28,579	19,959	20,045	20,049	20,018
	740	141,676	-0,008	28,324	28,451	28,441	19,997	20,086	20,079	20,054
	735	140,926	-0,007	28,217	28,337	28,324	20,027	20,112	20,103	20,080
	730	140,175	-0,008	28,115	28,236	28,221	20,062	20,148	20,137	20,116
	725	139,385	-0,009	28,012	28,150	28,130	20,101	20,201	20,187	20,163
	720	138,615	-0,009	27,914	28,060	28,046	20,143	20,248	20,238	20,210
	715	137,918	-0,009	27,829	27,960	27,964	20,183	20,278	20,281	20,247
	710	137,233	-0,008	27,746	27,872	27,885	20,223	20,314	20,324	20,287
	705	136,583	-0,008	27,673	27,800	27,800	20,266	20,359	20,358	20,327

	700	135,985	-0,009	27,599	27,726	27,705	20,301	20,394	20,379	20,358
	695	135,369	-0,008	27,535	27,648	27,652	20,345	20,429	20,432	20,402
	690	134,770	-0,008	27,473	27,589	27,592	20,390	20,476	20,478	20,448
	685	134,257	-0,011	27,411	27,528	27,522	20,423	20,510	20,506	20,480
	680	133,744	-0,009	27,360	27,476	27,485	20,462	20,549	20,556	20,522
	675	133,234	-0,007	27,314	27,430	27,435	20,505	20,592	20,596	20,564
	670	132,763	-0,010	27,272	27,379	27,384	20,547	20,628	20,632	20,602
	665	132,237	-0,008	27,220	27,348	27,342	20,589	20,686	20,682	20,652
	660	131,765	-0,008	27,178	27,305	27,302	20,631	20,727	20,725	20,694
	655	131,363	-0,010	27,144	27,260	27,260	20,669	20,758	20,757	20,728
	650	130,943	-0,008	27,114	27,237	27,223	20,711	20,806	20,795	20,771
	645	130,554	-0,008	27,074	27,207	27,197	20,742	20,844	20,836	20,808
	640	130,202	-0,010	27,041	27,176	27,166	20,775	20,878	20,871	20,841
	635	129,829	-0,010	27,026	27,147	27,137	20,823	20,915	20,908	20,882
	630	129,467	-0,009	27,005	27,118	27,121	20,864	20,952	20,954	20,923
	625	129,165	-0,011	26,993	27,102	27,111	20,905	20,989	20,996	20,963
	620	128,857	-0,009	26,981	27,085	27,094	20,944	21,026	21,032	21,001
	615	128,525	-0,009	26,959	27,069	27,076	20,981	21,066	21,072	21,040
	610	128,282	-0,009	26,948	27,061	27,068	21,013	21,100	21,106	21,073
	605	128,033	-0,009	26,944	27,065	27,068	21,050	21,144	21,147	21,114
	600	127,769	-0,010	26,942	27,060	27,062	21,092	21,185	21,187	21,155
	595	127,536	-0,010	26,933	27,047	27,055	21,124	21,214	21,220	21,186
	590	127,332	-0,008	26,928	27,056	27,051	21,153	21,254	21,249	21,219
	585	127,180	-0,008	26,930	27,053	27,049	21,179	21,276	21,273	21,243
	580	126,988	-0,009	26,943	27,045	27,051	21,223	21,303	21,307	21,278
	575	126,762	-0,010	26,950	27,055	27,053	21,266	21,349	21,348	21,321
	570	126,616	-0,011	26,945	27,056	27,055	21,287	21,375	21,374	21,346
	565	126,507	-0,012	26,944	27,055	27,058	21,306	21,393	21,396	21,365
	560	126,359	-0,011	26,952	27,055	27,070	21,336	21,418	21,430	21,395
	555	126,311	-0,012	26,975	27,072	27,088	21,363	21,440	21,453	21,419
	550	126,243	-0,009	27,007	27,102	27,111	21,399	21,474	21,481	21,451
	545	126,157	-0,008	27,015	27,127	27,131	21,419	21,508	21,511	21,479
	540	126,090	-0,009	27,013	27,133	27,136	21,429	21,524	21,527	21,493
	535	125,994	-0,007	27,034	27,148	27,145	21,461	21,552	21,549	21,521
	530	125,923	-0,009	27,049	27,162	27,161	21,486	21,576	21,575	21,545
	525	125,856	-0,013	27,054	27,161	27,169	21,504	21,588	21,595	21,562
	520	125,807	-0,013	27,080	27,172	27,181	21,533	21,606	21,613	21,584
	515	125,808	-0,017	27,094	27,189	27,197	21,547	21,622	21,628	21,599
	510	125,845	-0,022	27,108	27,211	27,223	21,554	21,636	21,646	21,612
	505	125,910	-0,022	27,144	27,243	27,260	21,572	21,650	21,664	21,629
	500	126,026	-0,021	27,207	27,304	27,309	21,601	21,678	21,682	21,654
	495	126,218	-0,018	27,281	27,391	27,374	21,625	21,713	21,699	21,679
	490	126,354	-0,010	27,357	27,461	27,466	21,657	21,740	21,744	21,714
	485	126,519	-0,003	27,443	27,550	27,560	21,692	21,777	21,785	21,751
	480	126,672	-0,003	27,489	27,616	27,612	21,703	21,803	21,800	21,769
	475	126,783	-0,008	27,541	27,644	27,646	21,728	21,809	21,811	21,783
	470	126,990	-0,014	27,603	27,695	27,702	21,745	21,817	21,823	21,795
	465	127,247	-0,020	27,664	27,771	27,770	21,752	21,836	21,836	21,808
	460	127,516	-0,020	27,739	27,854	27,845	21,766	21,856	21,849	21,823
	455	127,855	-0,021	27,847	27,950	27,955	21,792	21,874	21,877	21,848
	450	128,290	-0,020	27,965	28,055	28,057	21,810	21,880	21,882	21,857
	445	128,798	-0,012	28,094	28,192	28,184	21,820	21,895	21,890	21,868
	440	129,311	-0,009	28,235	28,315	28,330	21,841	21,902	21,914	21,886
	435	129,845	-0,013	28,369	28,454	28,484	21,857	21,922	21,945	21,908
	430	130,367	-0,011	28,538	28,646	28,662	21,897	21,980	21,992	21,956
	425	130,972	-0,010	28,733	28,829	28,839	21,944	22,017	22,025	21,995
	420	131,640	-0,014	28,909	28,999	29,033	21,969	22,037	22,063	22,023
	415	132,343	-0,014	29,138	29,216	29,245	22,026	22,085	22,106	22,072
	410	133,137	-0,017	29,358	29,451	29,462	22,061	22,131	22,139	22,110
	405	133,985	-0,020	29,573	29,664	29,682	22,084	22,151	22,165	22,133
	400	134,879	-0,018	29,762	29,844	29,890	22,076	22,136	22,171	22,128
	395	135,735	-0,018	29,885	29,979	30,001	22,027	22,097	22,113	22,079
	390	136,558	-0,019	29,911	30,008	30,022	21,915	21,985	21,996	21,965
	385	137,335	-0,018	29,820	29,926	29,946	21,723	21,800	21,815	21,780
	380	137,859	-0,018	29,802	29,913	29,934	21,628	21,709	21,724	21,687
	375	138,045	-0,008	30,000	30,110	30,111	21,737	21,816	21,817	21,790
	370	138,320	-0,046	30,098	30,175	30,275	21,785	21,841	21,914	21,847
	365	138,196	-0,035	29,882	30,019	30,034	21,642	21,742	21,752	21,712
	360	137,491	-0,027	29,424	29,564	29,413	21,416	21,517	21,408	21,447
	355	136,581	-0,007	28,620	28,689	28,605	20,958	21,009	20,947	20,971
	350	135,529	0,017	27,354	27,457	27,434	20,173	20,249	20,233	20,218
	345	134,767	0,036	25,633	25,708	25,760	18,999	19,054	19,093	19,049
	340	133,763	0,032	23,240	23,409	23,357	17,354	17,480	17,441	17,425

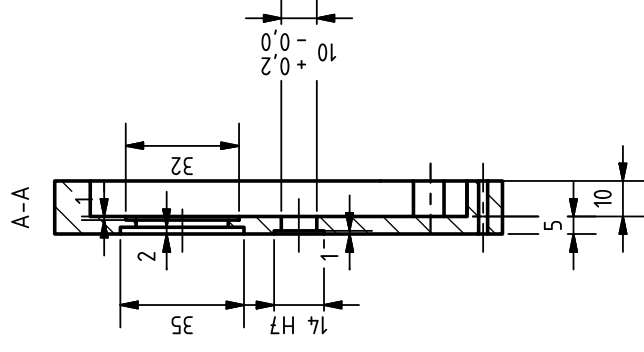
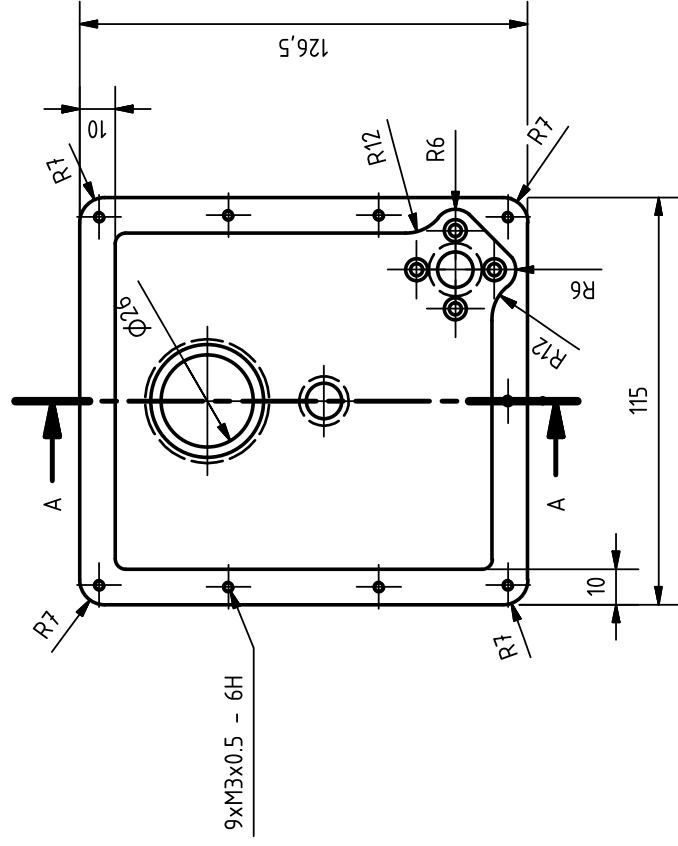
	335	132,030	0,016	20,117	20,224	20,252	15,227	15,308	15,329	15,288
	330	130,360	0,001	16,367	16,376	16,374	12,554	12,561	12,559	12,558
	325	128,844	0,014	12,069	12,123	12,086	9,357	9,399	9,370	9,375
	320	127,729	0,197	7,757	7,760	7,771	5,928	5,930	5,940	5,933
	315	126,944	0,134	4,157	4,143	4,144	3,172	3,162	3,162	3,165
	310	126,058	-0,010	1,738	1,750	1,758	1,386	1,396	1,402	1,395
	305	125,173	-0,012	0,524	0,533	0,535	0,428	0,435	0,437	0,433
	300	124,467	-0,010	0,103	0,107	0,112	0,091	0,094	0,098	0,094
	295	123,864	-0,004	0,017	0,017	0,029	0,017	0,017	0,026	0,020
	290	123,429	-0,006	0,007	0,002	0,020	0,010	0,006	0,021	0,012
	285	123,515	-0,011	0,004	0,000	0,024	0,012	0,009	0,029	0,017
	280	124,251	-0,008	-0,001	0,001	0,034	0,006	0,007	0,034	0,016
	275	125,849	-0,012	-0,004	-0,002	0,047	0,007	0,008	0,047	0,021
	270	128,482	-0,020	-0,007	-0,003	0,064	0,010	0,013	0,065	0,029
	265	132,025	-0,011	-0,005	-0,002	0,091	0,005	0,007	0,077	0,030
	260	137,011	-0,015	0,001	0,002	0,128	0,012	0,012	0,105	0,043
	255	144,157	-0,015	0,015	0,008	0,195	0,021	0,016	0,145	0,061
	250	154,800	0,018	0,044	0,044	0,347	0,017	0,017	0,212	0,082
Transmission ND4	1000	126,740	0,347	16,730	17,125	16,478	12,962	13,274	12,763	13,000
	995	127,294	0,235	16,664	17,066	16,427	12,930	13,246	12,744	12,973
	990	127,954	-0,001	16,551	16,946	16,301	12,936	13,245	12,741	12,974
	985	128,486	0,066	16,692	17,101	16,459	12,946	13,265	12,765	12,992
	980	129,093	0,151	16,820	17,226	16,624	12,927	13,243	12,775	12,982
	975	129,701	0,178	16,923	17,299	16,714	12,928	13,218	12,766	12,971
	970	130,326	0,187	17,016	17,406	16,802	12,931	13,231	12,767	12,976
	965	130,911	0,173	17,107	17,516	16,878	12,953	13,265	12,778	12,999
	960	131,577	0,186	17,191	17,631	16,988	12,942	13,278	12,788	13,003
	955	132,230	0,215	17,312	17,732	17,091	12,951	13,269	12,783	13,001
	950	132,862	0,257	17,391	17,809	17,117	12,921	13,236	12,714	12,957
	945	133,692	0,251	17,485	17,911	17,219	12,914	13,234	12,716	12,955
	940	134,610	0,272	17,613	18,022	17,409	12,908	13,213	12,756	12,959
	935	135,594	0,268	17,748	18,148	17,529	12,918	13,213	12,755	12,962
	930	136,588	0,252	17,845	18,267	17,614	12,904	13,213	12,734	12,951
	925	137,552	0,284	17,958	18,402	17,800	12,876	13,199	12,761	12,945
	920	138,504	0,302	18,148	18,604	17,940	12,913	13,243	12,763	12,973
	915	139,537	0,373	18,347	18,781	18,088	12,916	13,228	12,730	12,958
	910	140,729	0,396	18,483	18,925	18,248	12,889	13,204	12,722	12,938
	905	141,806	0,309	18,622	18,996	18,364	12,943	13,206	12,760	12,970
	900	142,782	0,408	18,765	19,173	18,516	12,894	13,180	12,719	12,931
	895	144,092	0,480	18,930	19,390	18,738	12,847	13,167	12,714	12,909
	890	145,698	0,457	19,052	19,520	18,890	12,803	13,125	12,691	12,873
	885	147,116	0,391	19,279	19,742	19,034	12,873	13,188	12,706	12,922
	880	148,029	0,361	19,556	19,960	19,177	12,999	13,273	12,743	13,005
	875	149,401	0,415	19,633	20,043	19,303	12,899	13,175	12,678	12,917
	870	151,109	0,137	19,756	20,056	19,525	12,995	13,194	12,842	13,011
	865	152,182	0,363	19,940	20,236	19,607	12,895	13,090	12,676	12,887
	860	153,467	0,601	20,181	20,382	19,681	12,809	12,940	12,482	12,744
	855	154,978	0,213	20,099	20,377	19,763	12,849	13,029	12,632	12,837
	850	155,853	-0,004	19,910	20,400	19,741	12,777	13,091	12,668	12,845
	845	156,292	-0,006	20,029	20,492	19,808	12,818	13,114	12,677	12,870
	840	156,678	-0,007	20,066	20,555	19,869	12,811	13,123	12,685	12,873
	835	157,067	-0,002	20,101	20,577	19,908	12,799	13,102	12,676	12,859
	830	157,165	-0,003	20,126	20,563	19,906	12,808	13,086	12,668	12,854
	825	156,899	-0,009	20,104	20,545	19,888	12,819	13,099	12,681	12,866
	820	156,514	-0,005	20,045	20,512	19,831	12,810	13,108	12,673	12,864
	815	155,927	-0,003	19,939	20,455	19,754	12,789	13,120	12,671	12,860
	810	155,163	-0,011	19,867	20,345	19,691	12,810	13,118	12,697	12,875
	805	154,377	-0,016	19,800	20,239	19,601	12,835	13,119	12,706	12,886
	800	153,540	-0,013	19,705	20,161	19,515	12,841	13,138	12,717	12,899
	795	152,584	-0,008	19,611	20,047	19,409	12,857	13,142	12,724	12,908
	790	151,610	-0,007	19,489	19,935	19,292	12,858	13,152	12,729	12,913
	785	150,565	-0,004	19,360	19,809	19,175	12,861	13,159	12,738	12,919
	780	149,528	-0,003	19,243	19,673	19,046	12,871	13,158	12,739	12,923
	775	148,426	-0,005	19,129	19,549	18,929	12,891	13,174	12,756	12,940
	770	147,342	-0,008	19,019	19,428	18,806	12,913	13,190	12,768	12,957
	765	146,387	-0,007	18,893	19,316	18,697	12,910	13,199	12,776	12,962
	760	145,449	-0,006	18,770	19,199	18,595	12,908	13,203	12,788	12,966
	755	144,416	-0,008	18,685	19,098	18,491	12,943	13,229	12,809	12,993
	750	143,471	-0,008	18,589	19,003	18,403	12,961	13,250	12,832	13,014
	745	142,575	-0,007	18,463	18,878	18,304	12,954	13,245	12,843	13,014
	740	141,676	-0,008	18,375	18,761	18,189	12,975	13,247	12,843	13,022
	735	140,926	-0,007	18,292	18,671	18,097	12,985	13,253	12,846	13,028
	730	140,175	-0,008	18,206	18,585	18,031	12,993	13,264	12,868	13,042


725	139,385	-0,009	18,128	18,489	17,956	13,011	13,270	12,888	13,056
720	138,615	-0,009	18,034	18,395	17,871	13,015	13,276	12,898	13,063
715	137,918	-0,009	17,952	18,334	17,783	13,022	13,299	12,899	13,074
710	137,233	-0,008	17,879	18,266	17,708	13,033	13,315	12,908	13,086
705	136,583	-0,008	17,813	18,192	17,640	13,047	13,325	12,920	13,097
700	135,985	-0,009	17,740	18,123	17,573	13,051	13,333	12,928	13,104
695	135,369	-0,008	17,673	18,054	17,511	13,060	13,342	12,941	13,114
690	134,770	-0,008	17,624	17,993	17,442	13,082	13,356	12,947	13,128
685	134,257	-0,011	17,556	17,930	17,382	13,083	13,362	12,954	13,133
680	133,744	-0,009	17,498	17,881	17,326	13,089	13,376	12,961	13,142
675	133,234	-0,007	17,458	17,832	17,275	13,108	13,388	12,970	13,156
670	132,763	-0,010	17,401	17,767	17,240	13,113	13,388	12,992	13,164
665	132,237	-0,008	17,341	17,712	17,187	13,119	13,399	13,003	13,174
660	131,765	-0,008	17,303	17,661	17,138	13,137	13,409	13,012	13,186
655	131,363	-0,010	17,268	17,609	17,090	13,151	13,411	13,016	13,193
650	130,943	-0,008	17,220	17,561	17,045	13,156	13,416	13,022	13,198
645	130,554	-0,008	17,168	17,522	17,007	13,155	13,427	13,032	13,204
640	130,202	-0,010	17,120	17,480	16,972	13,155	13,432	13,042	13,210
635	129,829	-0,010	17,080	17,434	16,937	13,162	13,435	13,052	13,216
630	129,467	-0,009	17,047	17,407	16,899	13,173	13,451	13,059	13,228
625	129,165	-0,011	17,017	17,370	16,866	13,182	13,455	13,065	13,234
620	128,857	-0,009	16,990	17,327	16,837	13,191	13,453	13,073	13,239
615	128,525	-0,009	16,969	17,299	16,816	13,209	13,466	13,089	13,255
610	128,282	-0,009	16,936	17,277	16,788	13,208	13,474	13,093	13,259
605	128,033	-0,009	16,904	17,253	16,762	13,208	13,481	13,098	13,262
600	127,769	-0,010	16,883	17,233	16,743	13,221	13,494	13,110	13,275
595	127,536	-0,010	16,864	17,208	16,719	13,230	13,499	13,116	13,282
590	127,332	-0,008	16,846	17,185	16,694	13,236	13,502	13,116	13,284
585	127,180	-0,008	16,834	17,167	16,682	13,242	13,504	13,122	13,289
580	126,988	-0,009	16,820	17,148	16,675	13,252	13,510	13,137	13,299
575	126,762	-0,010	16,797	17,127	16,661	13,258	13,518	13,150	13,309
570	126,616	-0,011	16,791	17,117	16,649	13,269	13,526	13,157	13,317
565	126,507	-0,012	16,787	17,109	16,641	13,277	13,532	13,162	13,324
560	126,359	-0,011	16,769	17,091	16,627	13,279	13,533	13,166	13,326
555	126,311	-0,012	16,772	17,082	16,624	13,287	13,532	13,169	13,329
550	126,243	-0,009	16,773	17,082	16,623	13,293	13,537	13,174	13,335
545	126,157	-0,008	16,767	17,081	16,625	13,296	13,545	13,183	13,341
540	126,090	-0,009	16,766	17,082	16,635	13,303	13,553	13,199	13,352
535	125,994	-0,007	16,763	17,089	16,631	13,310	13,568	13,205	13,361
530	125,923	-0,009	16,767	17,092	16,627	13,321	13,579	13,210	13,370
525	125,856	-0,013	16,769	17,089	16,630	13,332	13,586	13,222	13,380
520	125,807	-0,013	16,768	17,089	16,628	13,338	13,593	13,226	13,386
515	125,808	-0,017	16,778	17,096	16,631	13,348	13,601	13,231	13,393
510	125,845	-0,022	16,789	17,102	16,647	13,357	13,605	13,243	13,402
505	125,910	-0,022	16,818	17,124	16,668	13,372	13,615	13,253	13,413
500	126,026	-0,021	16,854	17,165	16,711	13,388	13,634	13,274	13,432
495	126,218	-0,018	16,897	17,205	16,763	13,400	13,643	13,293	13,445
490	126,354	-0,010	16,942	17,265	16,817	13,415	13,671	13,317	13,468
485	126,519	-0,003	17,001	17,321	16,876	13,439	13,692	13,340	13,491
480	126,672	-0,003	17,052	17,358	16,916	13,464	13,705	13,356	13,508
475	126,783	-0,008	17,085	17,393	16,947	13,481	13,724	13,372	13,526
470	126,990	-0,014	17,128	17,440	16,987	13,497	13,743	13,386	13,542
465	127,247	-0,020	17,190	17,500	17,038	13,522	13,766	13,403	13,564
460	127,516	-0,020	17,264	17,563	17,110	13,553	13,787	13,432	13,590
455	127,855	-0,021	17,339	17,641	17,185	13,575	13,812	13,455	13,614
450	128,290	-0,020	17,427	17,740	17,273	13,597	13,841	13,477	13,638
445	128,798	-0,012	17,526	17,859	17,392	13,616	13,874	13,511	13,667
440	129,311	-0,009	17,652	17,963	17,500	13,657	13,898	13,539	13,698
435	129,845	-0,013	17,765	18,071	17,612	13,691	13,926	13,573	13,730
430	130,367	-0,011	17,898	18,205	17,753	13,736	13,971	13,625	13,778
425	130,972	-0,010	18,079	18,361	17,905	13,810	14,025	13,677	13,837
420	131,640	-0,014	18,240	18,525	18,073	13,865	14,081	13,738	13,895
415	132,343	-0,014	18,406	18,701	18,233	13,917	14,140	13,787	13,948
410	133,137	-0,017	18,617	18,910	18,419	13,994	14,214	13,846	14,018
405	133,985	-0,020	18,819	19,105	18,623	14,058	14,272	13,912	14,081
400	134,879	-0,018	18,986	19,277	18,797	14,088	14,304	13,948	14,113
395	135,735	-0,018	19,135	19,434	18,960	14,109	14,329	13,980	14,139
390	136,558	-0,019	19,239	19,515	19,049	14,101	14,303	13,961	14,122
385	137,335	-0,018	19,273	19,544	19,067	14,044	14,242	13,895	14,060
380	137,859	-0,018	19,344	19,614	19,137	14,043	14,239	13,893	14,058
375	138,045	-0,008	19,592	19,774	19,276	14,198	14,329	13,969	14,165
370	138,320	-0,046	19,760	19,999	19,487	14,314	14,487	14,117	14,306
365	138,196	-0,035	19,678	20,038	19,459	14,261	14,521	14,102	14,295

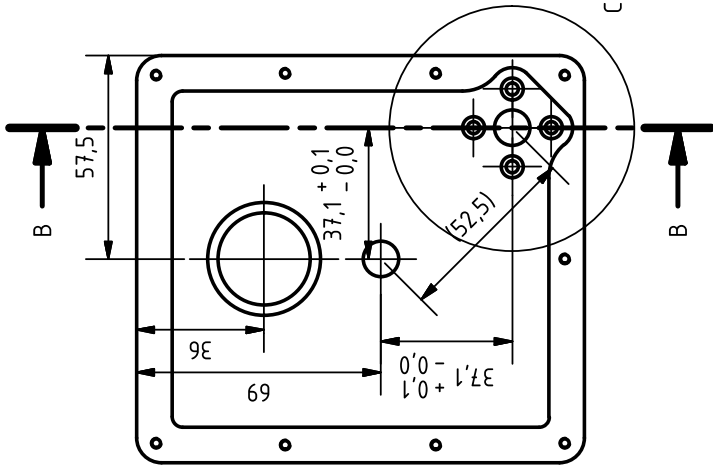
	360	137,491	-0,027	19,468	19,832	19,128	14,176	14,440	13,928	14,182
	355	136,581	-0,007	19,026	19,347	18,697	13,934	14,169	13,694	13,932
	350	135,529	0,017	18,397	18,601	18,120	13,563	13,714	13,359	13,546
	345	134,767	0,036	17,401	17,516	17,094	12,889	12,974	12,661	12,841
	340	133,763	0,032	15,799	16,072	15,597	11,790	11,994	11,639	11,808
	335	132,030	0,016	13,782	14,115	13,648	10,428	10,680	10,327	10,478
	330	130,360	0,001	11,344	11,552	11,173	8,701	8,860	8,570	8,711
	325	128,844	0,014	8,503	8,614	8,309	6,589	6,675	6,439	6,568
	320	127,729	0,197	5,531	5,587	5,416	4,183	4,226	4,093	4,167
	315	126,944	0,134	3,009	3,046	2,977	2,268	2,297	2,242	2,269
	310	126,058	-0,010	1,303	1,320	1,287	1,041	1,055	1,029	1,042
	305	125,173	-0,012	0,402	0,405	0,399	0,330	0,333	0,328	0,330
	300	124,467	-0,010	0,078	0,081	0,082	0,071	0,074	0,074	0,073
	295	123,864	-0,004	0,010	0,013	0,018	0,011	0,014	0,017	0,014
	290	123,429	-0,006	0,002	-0,001	0,011	0,006	0,004	0,014	0,008
	285	123,515	-0,011	-0,005	-0,003	0,011	0,005	0,007	0,018	0,010
	280	124,251	-0,008	-0,011	-0,004	0,014	-0,002	0,004	0,018	0,007
	275	125,849	-0,012	-0,010	-0,010	0,025	0,002	0,002	0,030	0,011
	270	128,482	-0,020	-0,009	-0,009	0,040	0,009	0,008	0,046	0,021
	265	132,025	-0,011	-0,008	-0,005	0,052	0,003	0,005	0,048	0,019
	260	137,011	-0,015	-0,002	-0,001	0,075	0,010	0,011	0,066	0,029
	255	144,157	-0,015	0,000	0,001	0,136	0,010	0,011	0,104	0,042
	250	154,800	0,018	0,030	0,031	0,265	0,008	0,008	0,159	0,058

B Anhang Fertigungszeichnungen

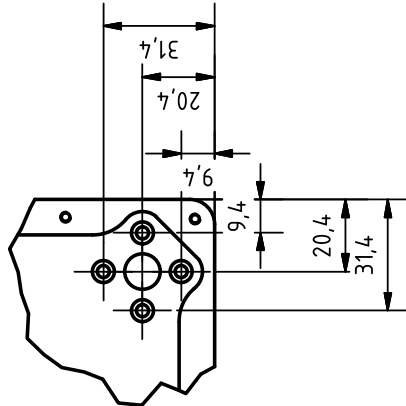
1	2	3	4	5	6
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung
1	1	Stk.	Rückwand		
2	1	Stk.	Achse		
3	1	Stk.	Filterrad		
4	1	Stk.	Halterad		
5	1	Stk.	Antriebsritzel		
6	1	Stk.	Vorderwand		
7	1	Stk.	Kameraanschluss		
8	1	Stk.	Zwischenring Objektiv		
9	2	Stk.	Gleitlager	GFM-081014-05	
10	1	Stk.	SIKO Encoder	AH25S	
11	8	Stk.	Senkschraube	ISO 2009 - M2 x 3	
12	1	Stk.	BLDC Motor	DB28M01	
13	1	Stk.	Messkamera	piA1000-48gm	
14	1	Stk.	Sicherungsring	DIN 471 - 26x1,2	
15	4	Stk.	Senkschraube	ISO 2009 - M3 x 10	
16	9	Stk.	Innensechskantschraube	ISO 4762 - M3 x 12	
17		Stk.			
18		Stk.			
19		Stk.			
20		Stk.			
21		Stk.			
22		Stk.			
23		Stk.			
24		Stk.			
25		Stk.			
26		Stk.			
27		Stk.			
			Datum	Name	
			Bearb.		
			Gepr.		
			Norm.		
					Blatt
					Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name		



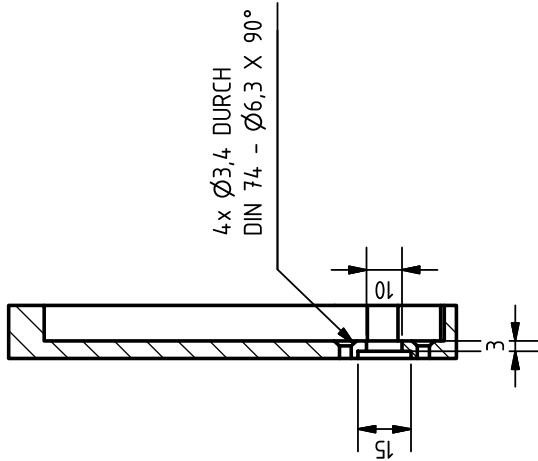
Allgemeintoleranzen DIN 7168-m						1 : 2		Aluminium 6061		
							Datum	Name		
							Gezeichnet 20.06.2016	M. Türpe		
							Kontrolliert			
							Norm			




C (1 : 2)

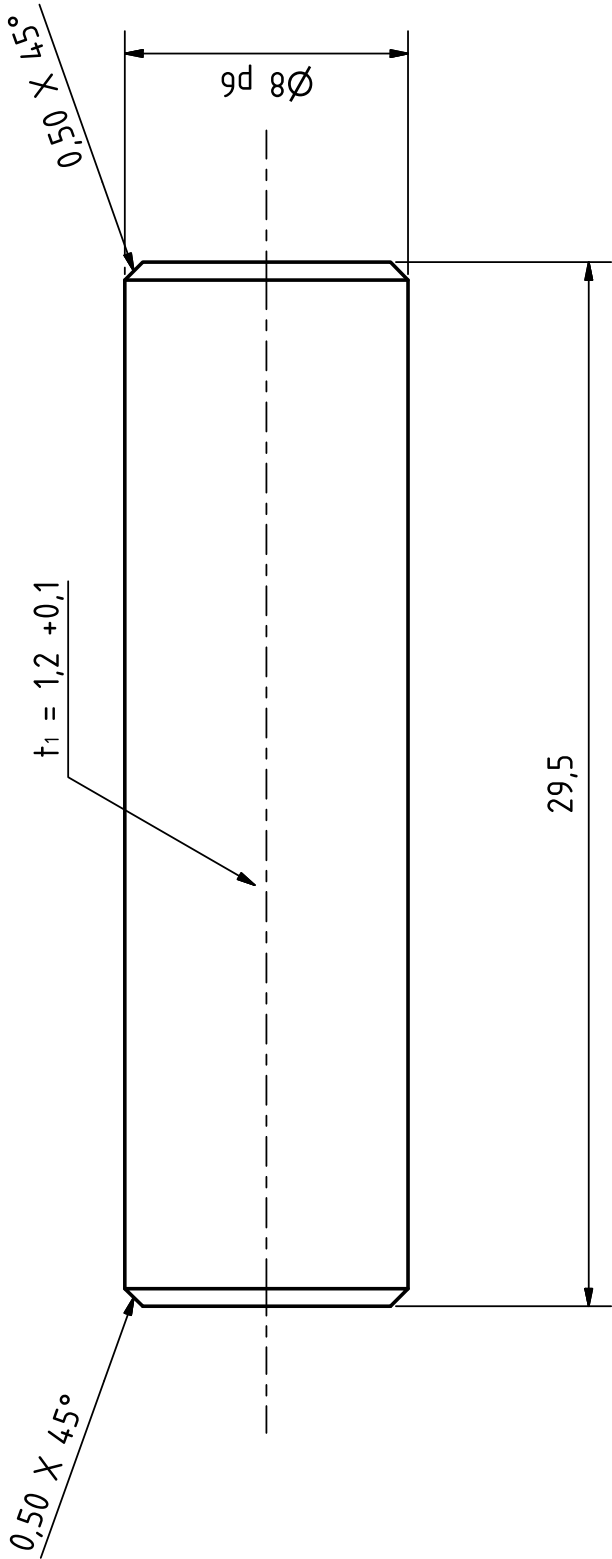



B-B (1 : 2)

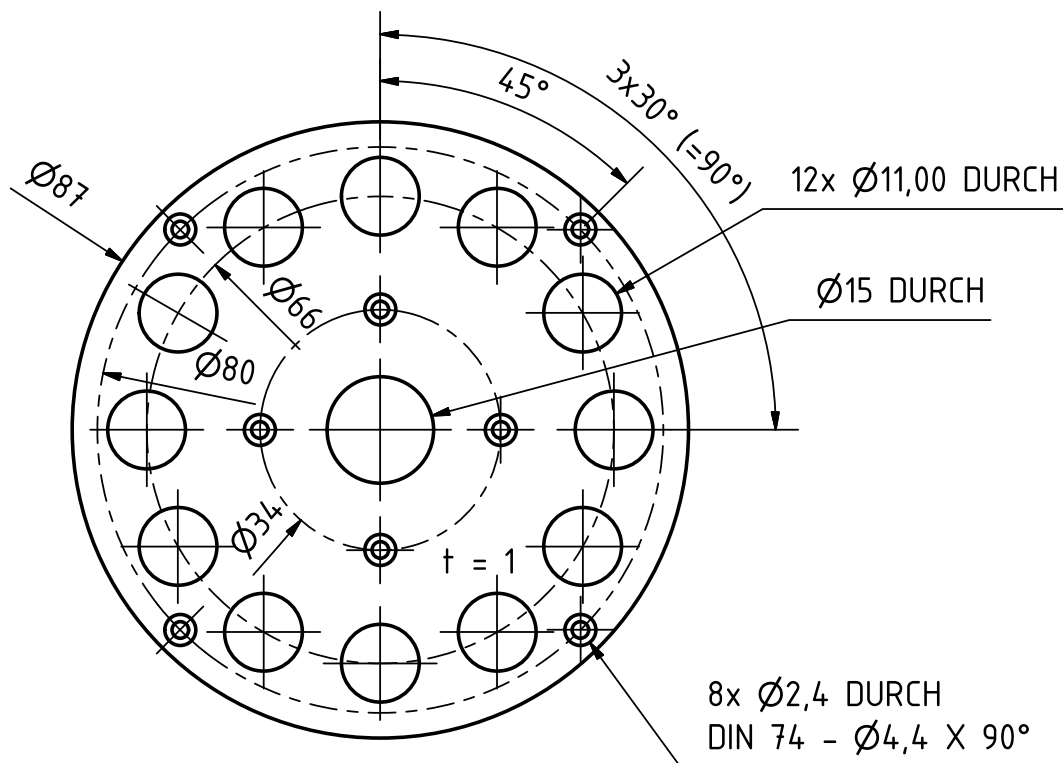



Allgemeintoleranzen DIN 7168-m					1 : 2		
							</





Allgemeintoleranzen DIN 7168-m				 DLR	5 : 1	Werkstoff Stahl		
						Achse		
						01.03.16		
						1		
						A4		
Status	Änderungen	Datum	Name					

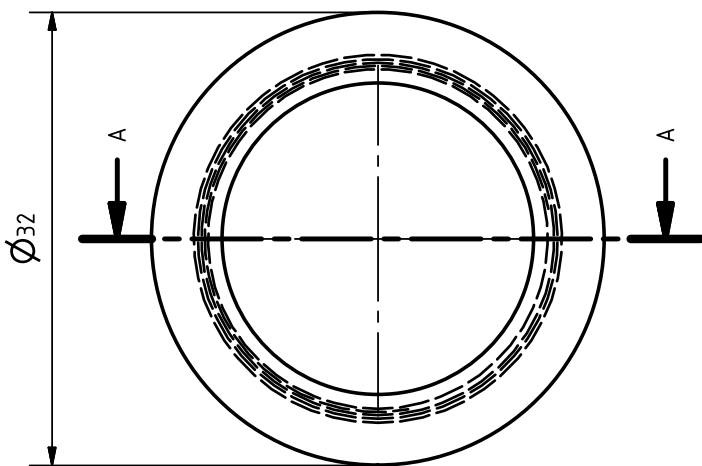



Allgemeintoleranzen DIN 7168-m				 DLR		1 : 1					
								Werkstoff Aluminium 6061			
					Datum	Name		Halterad			
				Gezeichnet	23.06.2016	M. Türpe					
				Kontrolliert							
				Norm							
								01.02.16		1	
								A4			
Status	Änderungen	Datum	Name								



Status	Änderungen	Datum	Name
--------	------------	-------	------





Allgemeintoleranzen DIN 7168-m					2 : 1		
				Datum	Name	Kameraanschluss	
				Gezeichnet 01.09.2016	M. Turpe		
				Kontrolliert			
				Norm			
						01.06.16	
Status	Änderungen	Datum	Name				
						1	A4



C Anhang Technik

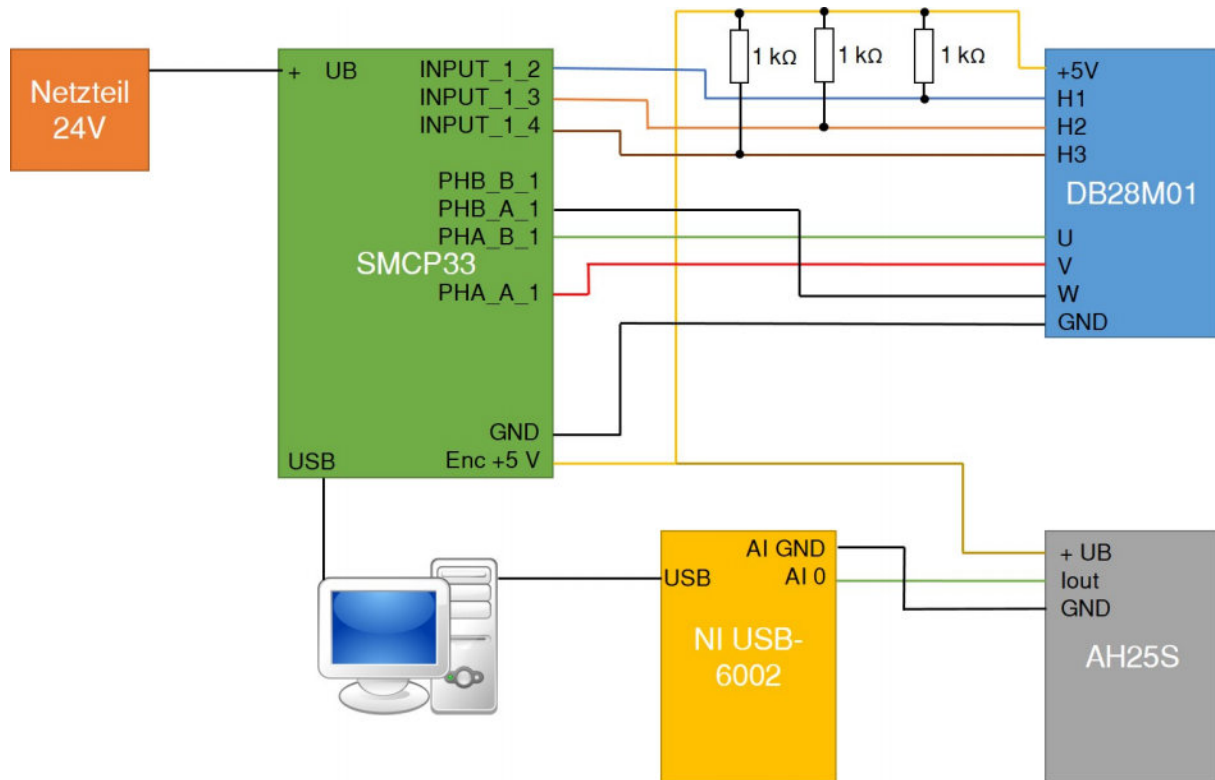


Abbildung C.1: Schaltplan Filterrada

Absolutgeber AH25S

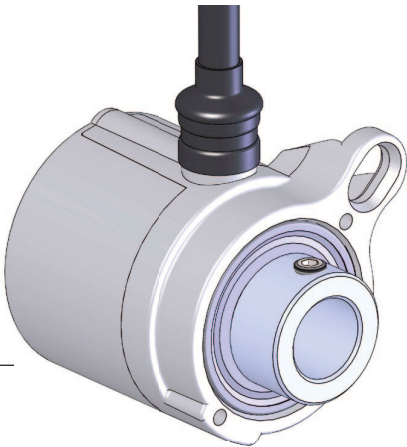


SIKO GmbH

Anschrift
Weihermattenweg 2
79256 Buchenbach

Telefon
+49 7661 394-0
Telefax
+49 7661 394-388

E-Mail
info@siko.de
Internet
www.siko-global.com



Merkmale:

- absoluter Miniatur Analoggeber
- einfache Montage durch ø8 mm Sacklochlöchlwelle
- 0 ... 10 V, 0.5 ... 4.5 V, 0 ... 20 mA oder 4 ... 20 mA Schnittstelle
- verschleißfreie Sensorik
- Hohe Schutzart IP65
- Temperaturbereich -40 ... 85 °C

Merkmal	Bestelltext		Ergänzung
Hohlwelle/Durchmesser (in mm)	8	A	Standard
Anschlussart	E1	B	offenes Kabelende Standard
Kabellänge (in m)	1,0 - 15,0	C	Standard: 1,0
Ausgang	0,5/4,5V	D	Messwandler 0,5 ... 4,5 V
	0/10V		Messwandler 0 ... 10 V
	0/20mA		Messwandler 0 ... 20 mA
	4/20mA		Messwandler 4 ... 20 mA
Messbereich	360°	E	
Drehrichtung	i	F	im Uhrzeigersinn steigende Werte
	e		entgegen dem Uhrzeigersinn steigende Werte

Ihre Bestellung:

AH25S

-

A

-

B

-

C

-

D

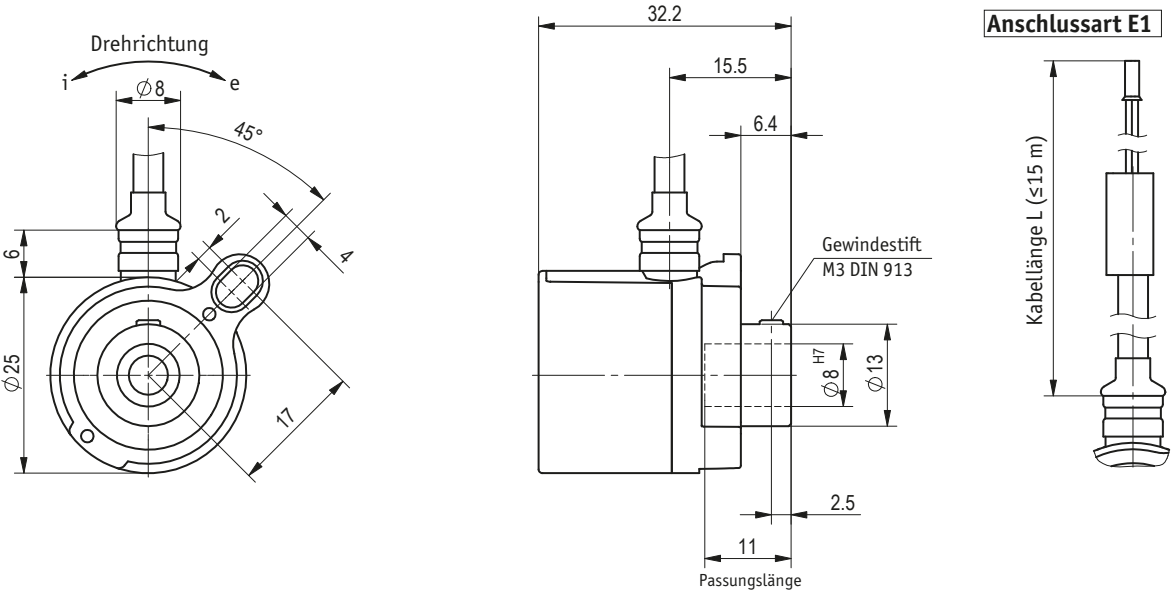
-

E

-

F

Absolutgeber AH25S



Anschlussbelegung E1 mit Stromausgang

Farbe	Belegung
weiß	GND
grün	Iout
braun	+UB

Anschlussbelegung E1 mit Spannungsausgang

Farbe	Belegung
weiß	GND
grün	Uout
braun	+UB

Technische Daten

Mechanische Daten:

Welle	Cu-Zn Legierung
Gehäuse	Zinkdruckguss
Drehzahl	≤6000 min ⁻¹
Kabelmantel	PUR
Gewicht	~0.08 kg

Ergänzung

Elektrische Daten:

Betriebsspannung	12 ... 30 V	
Ausgangsspannung	0 ... 10 V 0.5 ... 4.5 V	Bürde gegen GND ≥1 kΩ (0/10V) Bürde gegen GND ≥1 kΩ (0.5/4,5V)
Ausgangsstrom	0 ... 20 mA 4 ... 20 mA	Bürde gegen GND ≤500 Ω (0/20mA) Bürde gegen GND ≤500 Ω (4/20mA)
Genauigkeit	±1°	bei Messbereich 360°
Zykluszeit	≤1 ms	
Einschaltzeit	<1 ms	

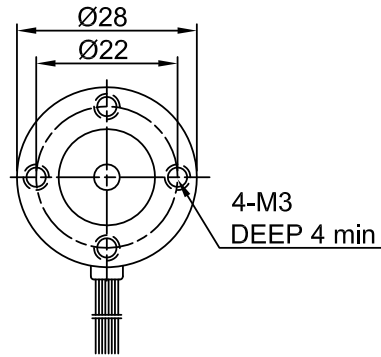
Systemdaten:

Ausfallrate	325 Jahr(e)	bei 60 °C (MTBF)
-------------	-------------	------------------

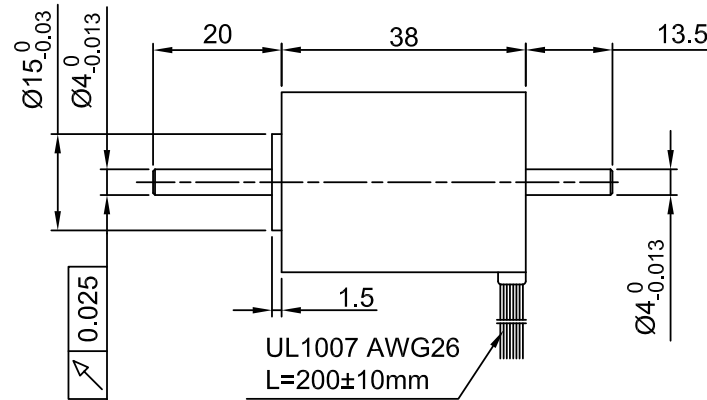
Umgebungsbedingungen:

Umgebungstemperatur	-40 ... 85 °C	
Lagertemperatur	-40 ... 85 °C	
relative Luftfeuchtigkeit	100 %	Betauung zulässig
Schutzart	IP65	EN 60529
Schockfestigkeit	500 ms ² , 11 ms	EN 60068-2-27
Vibrationsfestigkeit	<100 m/s ² , 5 ... 150 Hz	EN 60068-2-6

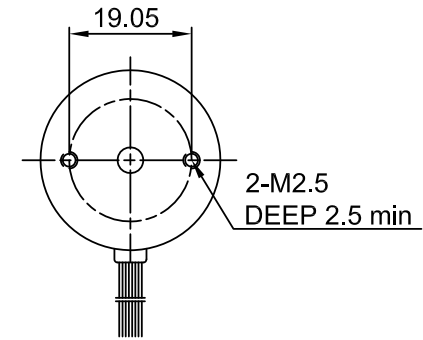
Front view and mounting



Side view

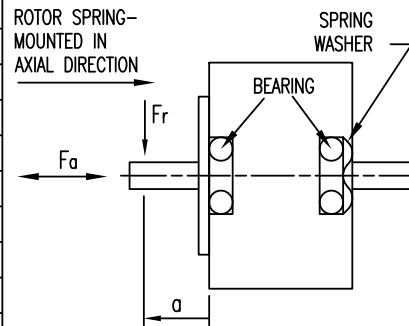


Rear view



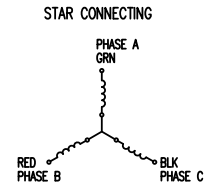
SPECIFICATION	CONNECTION	STAR
NO OF POLES/PHASE	4/3	
VOLTAGE RATED (VDC)	24	
CURRENT NO LOAD/RATED/PEAK (AMP)	0.15/0.88/2.8	
RESISTANCE/PHASE TO PHASE (Ohms) @25°C	4.63±15%	
INDUCTANCE/PHASE TO PHASE (mH) @1KHz	1.6±20%	
TORQUE RATED/PEAK (Nm) [lb-in]	0.014/0.042 [0.125/0.375]	
TORQUE CONSTANT (Nm/A)	0.016	
POWER RATED/PEAK (W)	14/40	
SPEED RATED/NO LOAD (RPM)	10000/15000	
ROTOR INERTIA (Kg-m²) [lb-in²]	2.12x10 ⁻⁷ [7.241x10 ⁻⁴]	
WEIGHT (Kg) [lb]	0.082 [0.18]	
TEMPERATURE RISE: MAX.80°C		
AMBIENT TEMPERATURE -10°~ 50°C [14°F ~ 122°F]		
INSULATION RESISTANCE 100 MOhm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)		
INSULATION CLASS B 130° [266°F]		
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1 MIN. (BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)		
AMBIENT HUMIDITY MAX. 85% (NO CONDENSATION)		

PERMISSIBLE RADIAL+AXIAL FORCE

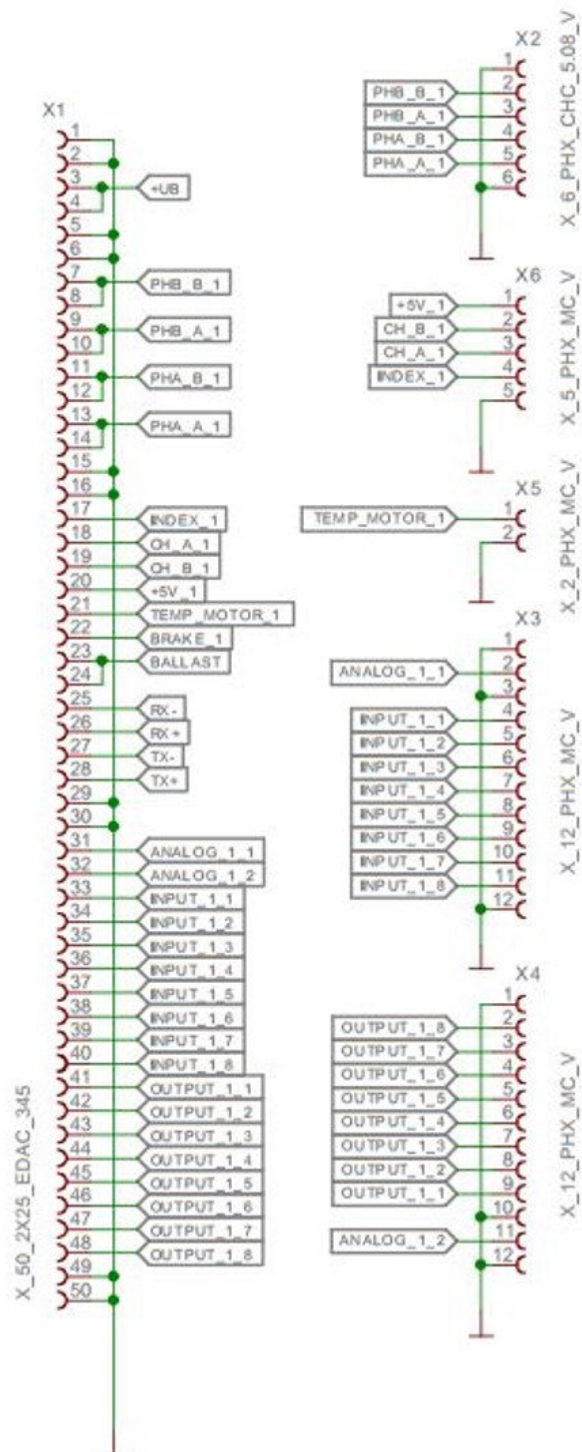


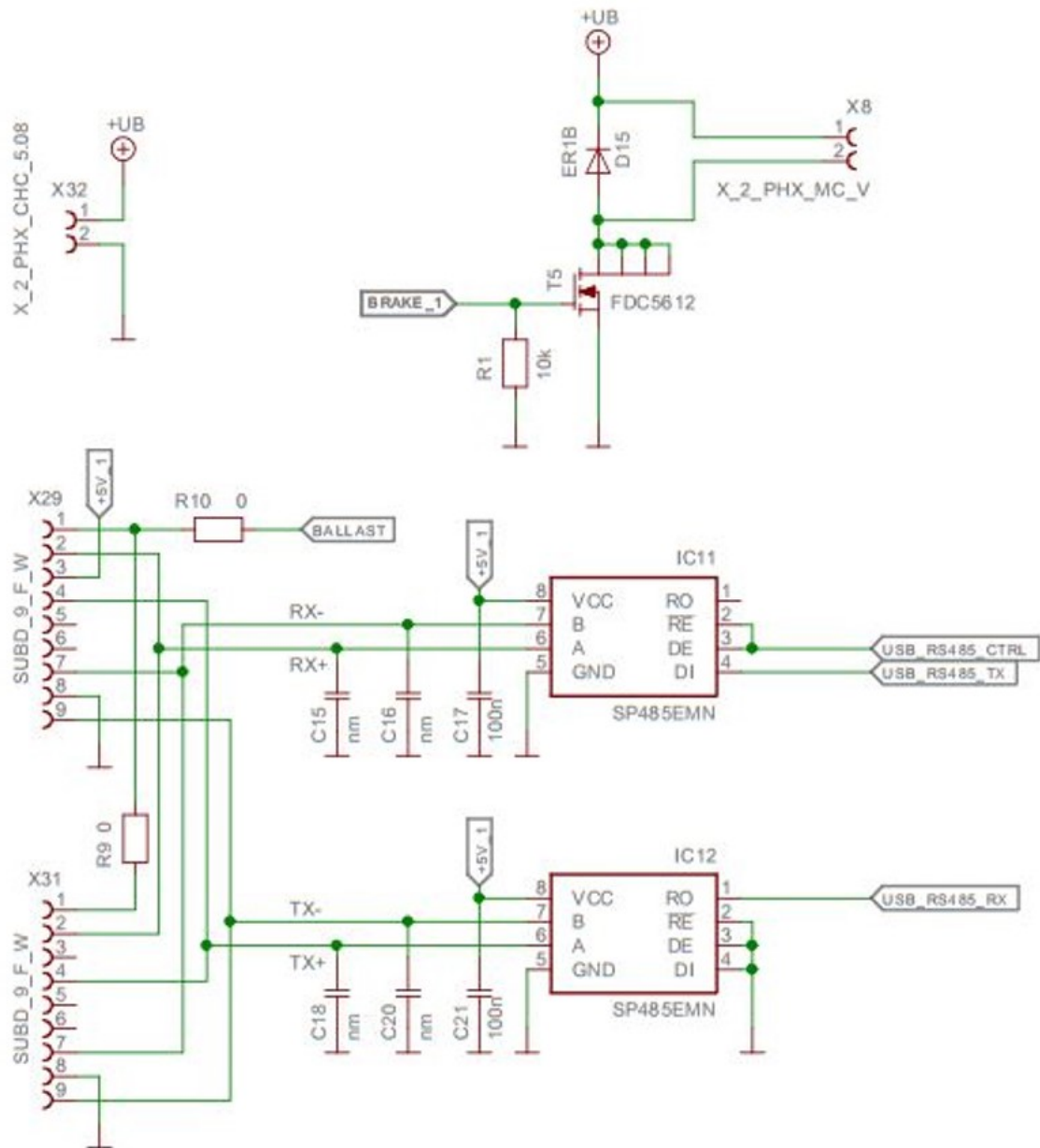
AXIAL-FORCE Fa (N)	Fa=10	
DISTANCE a (mm)	10	
RADIAL-FORCE Fr (N)	15	
	AXIAL	RADIAL
SHAFT PLAY (mm)	0.08	0.02
AT LOAD MAX: (N)	4.5	4.5

WIRING DIAGRAM									
	PIN	COLOR	FUNCTION	Dir. →					
MOTOR 4 POL.	6	GRN	U	X	HI	HI	X	LOW	LOW
	7	RED	V	HI	X	LOW	LOW	X	HI
	8	BLK	W	LOW	LOW	X	HI	HI	X
HALL 12 IMPL. REV.	1	YEL	+5V						
	2	BLU	H1	0	0	0	1	1	1
	3	ORG	H2	0	1	1	1	0	0
	4	BRN	H3	1	1	0	0	0	1
	5	WHT	GND						
ENCODER (OPTION)	6	YEL	A						
	7	BRN	A\						
	8	GRY	B						
	9	GRY/PINK	B\						
	10	VIOLET	I						
	11	RED/BLU	I\						



				NANOTEC: DB28M01	SCALE FREE	APVD	B.W.	23.05.07	BRUSHLESS DC MOTOR	
					X ±0.5 1PL ±0.2 2PL ±0.1 ANGLE ±30'	CHKD				
1	INDUCTANCE	22.06.07	J.W.			DRN	J.W.	23.05.07	DWG.NO	DB28M01
REV	DESCRIPTION	DATE	APVD			SIGNATURE		DATE		





Nanotec Electronic GmbH & Co KG
 Gewerbestrasse 11 D- 85652 Landsham
 Tel ++49 (0) 89 900 686 - 48
 Fax ++49 (0) 89 900 686 -50
info@nanotec.de

Abbildung C.2: Ausschnitt Datenblatt SMCP33